

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Technische Universität Darmstadt



MITTEILUNGEN

Heft 150

2015

Horst Nasner, Rainer Pieper, Patrick Torn

Sedimentation in Brackwasserhäfen

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Technische Universität Darmstadt



Sedimentation in Brackwasserhäfen

von

Horst Nasner, Rainer Pieper und Patrick Torn

von der
Hochschule Bremen
Institut für Wasserbau
Neustadtswall 30
D-28199 Bremen

Darmstadt, im Januar 2015

Diese Mitteilungsreihe hat zwei Wurzeln:

- die **“Wasserbau-Mitteilungen”** (41 Hefte), begründet 1966 von Prof. Dr.-Ing. Friedrich Bassler, später fortgeführt von Prof. Dr.-Ing. Josef Mock,
- die **“Technischen Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik”** (54 Hefte), herausgegeben seit 1965 von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Otto Kirschmer, später fortgeführt von Prof. Dr.-Ing. Ralph C. M. Schröder und Prof. Dr.-Ing. Manfred Ostrowski.

Mit dem Dienstantritt von Prof. Dr.-Ing. Ulrich Zanke als Nachfolger von Prof. Mock sind diese beiden Reihen zusammengeführt worden. Die zwei Fachgebiete des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft

- Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung
- Wasserbau und Hydraulik

dokumentieren damit auch nach außen ihre Zusammengehörigkeit. Die neue Nummerierung ergibt sich aus der Summe der Hefte beider Vorgängerreihen.

Die **“Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt”** erscheinen in unregelmäßiger Folge im Eigenverlag des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Ein Nachdruck, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung des Geschäftsführenden Institutsdirektors gestattet.

(ISSN 1430-3434)

FG Ingenieurhydrologie
u. Wasserbewirtschaftung
Franziska-Braun-Straße 7
64287 Darmstadt
Tel.: 0 61 51/16 21 43
FAX: 0 61 51/16 32 43
E-Mail: feldmann@ihwb.tu-darmstadt.de

FG Wasserbau und Hydraulik
Franziska-Braun-Straße 7
64287 Darmstadt
Tel.: 0 61 51/16 40 67
FAX: 0 61 51/16 32 23
E-Mail: wabau@wb.tu-darmstadt.de

Aktuelle Informationen über das Institut und seine Lehrangebote finden Sie im World Wide Web unter: <http://www.iww.tu-darmstadt.de>

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lehmann (Wasserbau und Hydraulik)
Dr.-Ing. Jochen Hack (Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung)

Sedimentation in Brackwasserhäfen

Vorwort von Prof. Ulrich Zanke

In Flüssen, die in ein salzhaltiges Gezeitenmeer münden, bildet sich eine Süß-Salzwasser-Mischzone aus. In dieser Brackwasserzone entsteht aus organischer sowie aus anorganischer Materie das Sediment Schlick. Eine wesentliche Ursache der Schlickentstehung liegt in der Bildung von Schleimen durch Mikroorganismen in der Brackwasserzone, wie auch im permanenten Absterben von Mikroorganismen aus dem salzhaltigen und dem Süßwassermilieu, die im Brackwasserbereich in jeweils für sie tödliche Umgebungsbedingungen geraten. Die organische Materie aus Schleimen und abgestorbener Biomasse bindet im Wasser befindliche, feinste Tonminerale an sich und bildet relativ große Flocken mit Durchmessern im Millimeterbereich und einer sehr geringen Sinkgeschwindigkeit. Flockengröße und Sinkverhalten haben eine gewisse Spannbreite. Die Ursache liegt sowohl in den biochemischen Randbedingungen wie auch im örtlichen Turbulenzklima, wobei letzteres mit wachsender Intensität zum Auseinanderbrechen der Flocken führt und bei geringer Intensität eine (Wieder-)Vereinigung kleinerer Flocken zu größeren Flocken zulässt. Daher hat z.B. der Schlick der Elbe nicht genau die gleichen Eigenschaften wie der in der Weser oder Ems.

Suspendierter Schlick bleibt aufgrund seiner geringen Sinkgeschwindigkeit im Wasser auch bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten überwiegend in Suspension und setzt sich in strömungsberuhigten Zonen ab, z.B. in Buhnenfeldern oder in Häfen. Haben sich die Schlickflocken erst einmal abgesetzt, sind vergleichsweise starke Strömungen erforderlich, um sie wieder zu erodieren. Ansonsten konsolidieren sie sich. Beim Gezeitenwechsel kann sich der Schlick sogar in den Fahrrinnen der Flüsse absetzen und anreichern. Nahe der Sohle kann die dort hochkonzentrierte Suspension in einen als Flüssigschlick bezeichneten weichen Boden, mit eigenen Fließeigenschaften, übergehen. Hier muss z.T.

gebaggert werden, weil Schiffe solche Schlicksuspensionen (Flüssigschlick, *fluid mud*) nur noch bedingt durchfahren können. Im Längsverlauf der Ems kommen während etwa 2/3 des Jahres mehrere Meter dicke Schlickschichten in der tiefen Rinne vor.

Wasserbaulich verursacht Schlick mithin laufende Kosten zum Erhalt von Wassertiefen. In Häfen, die im Einflussbereich der Brackwasserzone liegen, sind Auflandungen von mehreren Metern je Jahr sind nicht ungewöhnlich. Das betrifft an unserer Küste zum Beispiel Emden, Wilhelmshaven oder Bremerhaven. Weiterhin kann sich Schlick, insbesondere wenn er so hochkonzentriert ist wie in der Ems ist, nicht nur während des Strömungsstillstandes beim Gezeitenwechsel in den Fahrrinnen der Flüsse absetzen und anreichern, sondern auch während größerer Strömungsgeschwindigkeiten. Auch hier muss z.T. gebaggert werden, weil Schiffe eine hochkonzentrierte Schlicksuspensionen (Flüssigschlick, *fluid mud*) nur noch bedingt durchfahren können.

Diese Schlickproblematik ist von Natur aus gegeben, kann aber durch ungünstige Eingriffe verschärft werden. So hat sich nach Vertiefungen der Ems z.B. die dortige Schlicksituation erheblich zum Negativen entwickelt. Dabei ist neben erhöhtem Baggeraufwand eine Verstärkung der Trübe (erhöhte Schlickkonzentration im Wasser) von großer Tragweite, in deren Folge die Lebensbedingungen im Gewässer bis hin zum Aussterben oder Abwandern von Arten beeinträchtigt werden.

Bei zukünftigen Planungen zu Eingriffen in die betroffenen Gewässer sind also deren Auswirkungen auf das Schlicksystem zu analysieren und vorherzusagen. Dies ist nur mit hydro-morphodynamischen Modellen möglich. Hydraulische Modelle scheiden hier aus, weil eine Naturähnlichkeit, wenn überhaupt, nur mit äußerst hohem Aufwand herstellbar ist. Numerische Modelle müssen hingegen die vollständige Physik der Schlickdynamik abbilden, was aber aufgrund des noch unvollständigen Wissensstandes, insbesondere der Flüssigschlickdynamik, teilweise empirische Formulierungen unumgänglich macht. An diesem Punkt wird die Bedeutung von Messungen und Auswertungen der Schlickdynamik in der Natur offensichtlich, denn erst dadurch wird eine Überprüfung und Verbesserung der numerischen Modelle möglich.

Wegen der Bedeutung der Schlickproblematik hat das Bundesforschungsministerium (BMBF) zu diesem Thema verschiedene Projekte gefördert, von denen zwei an das Institut für Wasserbau der Technischen Universität Darmstadt vergeben wurden. Über die

Ergebnisse dieser beiden, auf numerischen Modellierungen basierenden, Projekte wurde international berichtet sowie in deutscher Sprache in den Institutsmitteilungen (Wurpts, Heft 140/2006) und der Fachzeitschrift „Die Küste“ (Roland, 2012).

In den ebenfalls vom BMBF geförderten KFKI-Projekten 03KIS 019 und 03KIS 051 sind in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen an der Ems (Emden), Weser (Bremerhaven) und Elbe (Nord-Ostsee-Kanal) vom Institut für Wasserbau der Hochschule Bremen (**Prof. Nasner, Dipl.-Ing Pieper und Dipl.-Ing. Torn**) umfangreiche Messungen in der Natur durchgeführt worden. Auf deren Grundlage konnten die komplizierten Fliess-, Transport- und Sedimentationsvorgänge in Brackwasserhäfen besser erfasst und erklärt werden. Die hydrodynamischen und morphologischen Vorgänge sind mit Strömungs-, Salzgehalts-, und Schwebstoffmessungen, sowie Peilplananalysen, Bodenentnahmen und Eigenschaften des *fluid mud* wie Dichte, Zähigkeit, Feststoffgehalt und organischem Anteil untersucht worden.

Damit liegen für die Brackwasserhäfen an der deutschen Nordseeküste neue Erkenntnisse aus der Natur vor, die auch zur Prüfung und Fortentwicklung von morphodynamisch-numerischen Modellen genutzt werden können. Diese Messergebnisse sind auf vielfältige Art und Weise im Rahmen enger fachlicher Zusammenarbeit in die Erweiterung der Modellansätze durch die Forschungsprojekte am Institut für Wasserbau einbezogen worden und werden in diesem Zusammenhang auch weiter genutzt.

Ich freue mich, dass dieser, unsere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Thema Schlick ergänzende Beitrag, in der Schriftenreihe des Instituts erscheint.

Hannover / Darmstadt, im Januar 2015

Ulrich Zanke

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Vorbemerkungen	1
1.2	Sedimentationsursachen von Hafenbecken	2
1.3	Aufgabe	4
2	Untersuchungsgebiete und Tideverhältnisse	5
3	Anmerkungen zu den in situ Messungen	12
4	Messungen in Bremerhaven	14
4.1	Bremerhaven Nordschleuse	14
4.1.1	Strömungen in der Weser	14
4.1.2	Salzgehalte	27
4.1.3	Schwebstoffe	34
4.1.4	Strömungen im Vorhafen	37
4.1.5	Salzgehalte	43
4.1.6	Schwebstoffe	45
4.2	Bremerhaven Kaiserschleuse	50
4.2.1	Strömungen in der Weser	50
4.2.2	Salzgehalte	64
4.2.3	Schwebstoffe	68
4.2.4	Strömungen im Vorhafen	71
4.2.5	Salzgehalte	76
4.2.6	Schwebstoffe	78
4.3	Bremerhaven Doppelschleuse	83
4.3.1	Strömungsmessungen	83
4.3.2	Salzgehalte	90
4.3.3	Schwebstoffe	93
5	Messungen in Emden	96
5.1	Strömungen in der Ems	96
5.2	Salzgehalte	107
5.3	Schwebstoffe	115
5.4	Strömungen im Vor- und Außenhafen in Emden	118
5.5	Salzgehalte	122
5.6	Schwebstoffe	125
6	Messungen in Brunsbüttel	131
6.1	Strömungen in der Elbe	131
6.2	Schleusenvorhöfen am Nord-Ostsee-Kanal	158
6.2.1	Strömungen im Neuen Vorhafen	158
6.2.2	Strömungsmessungen im Alten Vorhafen	173
6.2.3	Salzgehalte	180
6.2.4	Schwebstoffe	188
7	Zusammenfassende und ergänzende Betrachtungen zu den in situ Messungen	203
7.1	Mittlere Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten in den Tideflüssen	204
7.1.1	Bremerhaven	204
7.1.2	Emden	210

7.1.3	Brunsbüttel	212
7.2	Oberwasser und Salzgehalte	219
7.2.1	Bremerhaven	219
7.2.2	Emden	228
7.2.3	Brunsbüttel	230
7.3	Überlagerung von Strömungs-, Dichte- und Tideeffekten	238
8	Fluid Mud Untersuchungen	241
8.1	Peilplananalysen	241
8.1.1	Vorbemerkungen	241
8.1.2	Bremerhaven	241
8.1.3	Emden	251
8.1.4	Brunsbüttel	254
8.2	Bodenproben	256
8.2.1	Vorbemerkungen	256
8.2.2	Bremerhaven	256
8.2.3	Emden	261
8.2.4	Brunsbüttel	261
8.3	Eigenschaften von Fluid Mud	266
8.3.1	Vorbemerkungen	266
8.3.2	Bremerhaven	268
8.3.3	Emden	271
8.3.4	Brunsbüttel	275
8.4	Zusammenfassende und ergänzende Anmerkungen	282
9	Schlussbemerkungen	285
	Schrifttum	287
	Vorträge und Veröffentlichungen	289
	Abbildungsverzeichnis	292

1 Einleitung

1.1 Vorbemerkungen

In der Vergangenheit sind vom Institut für Wasserbau (IWA) der Hochschule Bremen mehrere Forschungsvorhaben zum Verlandungsgeschehen in Tidehäfen an der deutschen Nordseeküste bearbeitet worden (Abb. 1).



Abb. 1: Deutsche Nordseeküste

In einem vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) geförderten KFKI-Projekt (MTK 0470) wurden die Sedimentationen mit der Analyse von Kontrollpeilungen bestimmt. Unter Einbeziehung der zugehörigen hydrologischen Randbedingungen lagen mit den Auswertungen quantitative Ergebnisse für die Sedimentationsraten und -mengen von Tidehäfen in deutschen Ästuarien oberhalb und unterhalb der Brackwasserzone vor (HOCHSCHULE BREMEN (LfW), 1992 und NASNER, 1992).

Für das folgende vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte KFKI-Projekt (MTK 0544) wurde ein neues, satellitengestütztes Treibkörpermesssystem entwickelt und eingesetzt (PIEPER und TORN, 1996). Gegenstand der Untersuchungen war die Wechselwirkung zwischen Strömungen und Sedimentation in offenen Tidehäfen. Der Kornaufbau und mineralische Anteil der Hafensedimente ist regional den Strömungsbedingungen entsprechend verschieden (HOCHSCHULE BREMEN (LfW), 1996 und NASNER, 1997).

Mit zwei weiteren vom BMBF geförderten KFKI-Projekten (03KIS019 und 03KIS051) sollten

die Ursachen der besonders hohen Auflandungen in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen an der Ems, Weser und Elbe in Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel näher erforscht werden (Abb. 1). Mit umfangreichen Messungen in der Natur wurden die komplexen Fließ-, Transport- und Sedimentationsvorgänge besser erkannt (HOCHSCHULE BREMEN (IWA), 2003 und 2009). In diesem Beitrag werden zur Vervollständigung auch einige Ergebnisse aus dem Projekt 03KIS09 erwähnt (vgl. NASNER 2004a).

Mit den aus der Natur gewonnenen Daten können allgemein gültige Gesetzmäßigkeiten für die verschiedenen Untersuchungsgebiete und Tiderströme abgeleitet werden. Außerdem sind mit den Untersuchungen die Grundlagen für eine bessere Aussagefähigkeit von numerischen Modelluntersuchungen geschaffen worden.

1.2 Sedimentationsursachen von Hafenbecken

Im Brackwasserbereich eines Tideflusses werden die offenen Hafenbecken durch drei Strömungseffekte beeinflusst (Abb. 2).

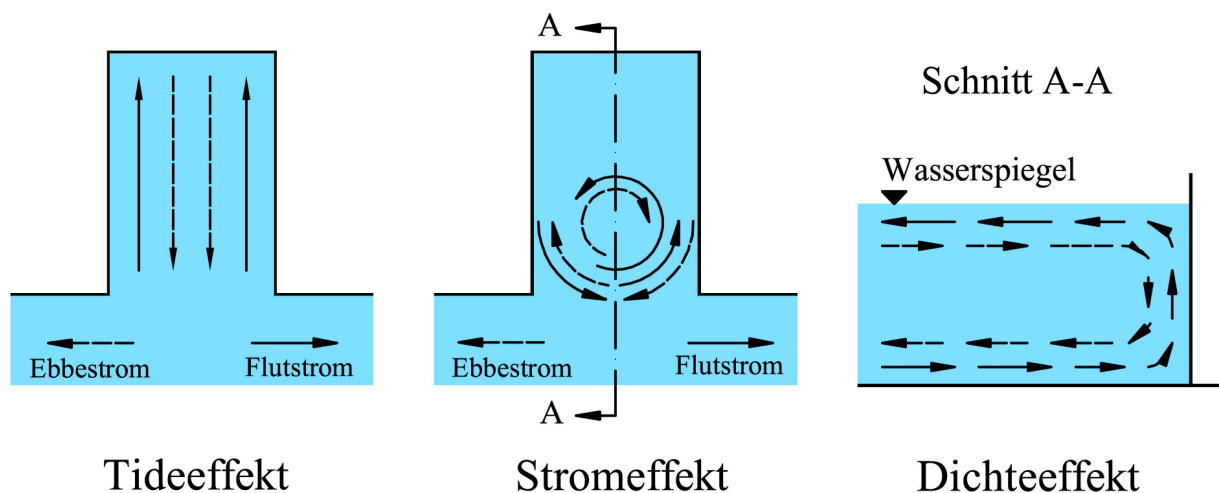


Abb. 2: Strömungs-, Tide- und Dichteeffekt, schematisch

• Strömungseffekt

Wenn Wasser mit großer Transportkapazität an einem Hafen vorbeiströmt wird im Einfahrtbereich eine als Walze bezeichnete Drehströmung mit vertikaler Achse angeregt. Die mit der Strömung in den Hafen transportierten Feststoffe lagern sich verstärkt im Inneren der Walze ab. Von Bedeutung ist der Umstand, dass es durch die Walzenströmungen zu einem erhöhten Wasseraustausch zwischen Hafenbecken und Tiderstrom kommt (z. B. DURSTHOFF, 1970; FÜHRBÖTER u. WITTE, 1988; BRINKMANN, 1996).

Der Strömungseffekt tritt auch in richtungskonstant strömenden Binnengewässern auf. Im Tiderstrom kehrt sich die Drehrichtung der Walzen im Tiderhythmus um. Die Intensität der Walzenströmung wird durch die Ausbautiefe, Hafengeometrie, Hafeneinfahrtsbreite und ihre Lage zum Strom beeinflusst.

- **Tideeffekt**

Die Flut- und Ebbestromwalzen werden von den Tideeffekten überlagert. Bei jeder Flut füllt sich das Hafenbecken um ein Walzenvolumen, dass sich aus dem Produkt von Hafenfläche und Tidehub ergibt. Während der Flutstromphase sedimentieren Feststoffe in den strömungsberuhigten Zonen, die mit der Ausströmung des Wasservolumens während der Ebbephase wegen der geringeren Strömungsintensitäten nicht resuspendiert und in den Fluss zurück transportiert werden.

- **Dichteeffekt**

In Brackwasserhäfen treten zusätzlich Dichteeffekte auf. Im Tidestrom werden die Sohlströmungen während der Flutstromphase durch das von See eindringende Salzwasser verstärkt. In der Ebbestromphase verstärkt das in Richtung Nordsee transportierte, spezifisch leichtere Oberwasser aus dem Binnenland die Strömungen in den oberen Wasserschichten. Auch in den angrenzenden Hafenbecken werden der Tide- und Strömungseffekt durch Dichteströmungen überlagert. Wie in (Abb. 2) vereinfacht dargestellt, bilden sich während der Flutstromphase Walzenströmungen mit horizontaler Achse aus. Der Drehsinn kehrt sich bei Ebbestrom um. Durch die Dichteströmungen wird der Wasseraustausch und damit auch der Feststoffeintrag zusätzlich erhöht.

Die in Abb. 2 dargestellten Vorgänge überlagern und ergänzen sich gegenseitig. Sie sind in der Natur sehr viel komplizierter. Die besonderen hydrodynamischen Gegebenheiten in den Vorhäfen von Bremerhaven, Emden und dem Nord-Ostsee-Kanal wurden vom IWA der Hochschule Bremen eingehend untersucht und werden mit dieser Arbeit dokumentiert. Auf die Überlagerungen der Strömungs-, Tide- und Dichteeffekte wird später noch näher eingegangen.

Der Dichteeffekt ist ursächlich dafür, dass in den Brackwasserhäfen sehr viel stärkere Sedimentationen auftreten als oberhalb des Salzwassereinflusses der Nordsee gelegenen Seehäfen. Mit Peilplananalysen wurde ermittelt, dass die mittleren jährlichen Sedimentationen in Bremen und Hamburg in der Größenordnung von zwei bis drei Dezimetern liegen. In Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel sind die durchschnittlichen Sedimentationen von rd. einer Zehnerpotenz höher (HOCHSCHULE BREMEN (LfW), 1992 und 1996; CHRISTIANSEN und HAAR, 1996).

Die Brackwasserhäfen zeichnen sich nicht nur durch die starken Sedimentationen aus. Die aus den Tideflüssen eingetragenen marinen und limnischen Sedimente haben hohe organische Anteile. Über der festen Sohle kann sich flüssiger Schlick (Fluid Mud) mit mehreren Metern Mächtigkeit bilden. Dieses Phänomen ist Gegenstand intensiver Forschung. Die Navigierbarkeit von Schiffen in diesem Medium und die damit verbundene Frage nach der nautischen Tiefe ist von besonderem Interesse.

1.3 Aufgabe

Zur Sedimentation in Häfen an strömenden Gewässern sind in den vergangenen Jahrzehnten eine Vielzahl von Laboruntersuchungen an hydraulischen Modellen durchgeführt worden. Überwiegend handelt es sich dabei um Versuche mit richtungskonstanter Strömung. Die ersten systematischen Untersuchungen wurden von ROHR (1933) durchgeführt. Auch VOLLMERS (1963) untersuchte Einbauten im Einfahrtsbereich zur Schwächung des Energieeintrags durch die Walzenströmungen. Es war ebenso wie bei ROHR das Ziel die Schwebstoffablagerungen in Binnenhäfen zu mindern. Grundlegende Untersuchungen über die Austauschvorgänge durch den Strömungseffekt wurden später von DURSTHOFF (1970) durchgeführt. BRINKMANN (1996) betrachtete im Modell zusätzlich Tideströmungen.

Nach Modellversuchen des FRANZIUS-INSTITUTS der Universität Hannover (1988) wurde in der Einfahrt des Hamburger Hafenbeckens Köhlfleet eine Umlenkwand gebaut. Damit sollten die Walzenströmungen und Sedimentationen eingeschränkt werden (SCHWARZE et. al., 1995). Inzwischen sind auch hydraulische Modellversuche für eine Umlenkwand in brackwasserbeeinflussten Häfen durchgeführt worden (LEEUEWEN und HOFLAND, 1999). Erfahrungen in einem Prototyp liegen noch nicht vor.

Die „unübersichtlichen“ Strömungsverhältnisse in der Einfahrt von Brackwasserhäfen durch Überlagerung von Strömungs-, Tide- und Dichteeffekten werden anschaulich von HENSEN (1953) in einem Bericht zu Modellversuchen für den Amerikahafen in Cuxhaven beschrieben. In einer auf Natur- und Modelldaten basierenden theoretischen Abhandlung weist EYSINK (1988) auf den starken Einfluss der Dichteströmungen bei der Sedimentation von Brackwasserhäfen hin. Als neue Veröffentlichungen zu Sedimentationsproblemen in Häfen von Brackwasserzonen sei noch auf die Arbeiten von STOSCHEK (2003) und PIANC (2008) verwiesen.

Um die Strömungs- und Sedimentationsvorgänge in vom Brackwasser beeinflussten Hafenbecken besser verstehen zu lernen sind drei Vorgehensweisen denkbar, die sich bei der Problemlösung ergänzen können. Lösungsansätze sind Versuche mit hydraulischen Modellen, theoretisch-numerische Methoden oder Untersuchungen in der Natur selbst.

Die komplizierten physikalischen, biologischen und chemischen Vorgänge bei den Strömungs- und Sedimentationsvorgängen der kohäsiven Sedimente sind, wenn überhaupt, sehr schwer zu berechnen. Mit theoretischen Ansätzen und numerischen Modellen sind deshalb bisher eher qualitative Aussagen möglich. Wegen der Maßstabeffekte und Problemen bei der naturähnlichen Nachbildung der Sedimente haben auch physikalische Modelle eher einen vergleichenden Charakter. Bei Untersuchungen in der Natur (in situ) ergibt sich das Problem, dass die Vorgänge nicht wie im Modell beliebig wiederholbar sind.

Mit modernen Messmethoden und Geräten sind heute bei in situ Messungen sehr gute Ergebnisse zu erzielen. Die Daten aus dem Prototyp sind unerlässlich für die Eichung hydraulischer und mathematischer Modelle. Die vom IWA aus der Natur gewonnenen Daten zeigen allgemein gültige Gesetzmäßigkeiten für Brackwasserhäfen in den verschiedenen Tideströmen. Sie können als Grundlage für verbesserte Aussagefähigkeiten von numerischen Untersuchungen dienen.

Mit der folgenden Arbeit werden die Ergebnisse der Strömungs-, Salzgehalts- und Schwebstoffuntersuchungen im Bereich der Brackwasserhäfen an der Weser, Ems und Elbe dokumentiert und erläutert. Außerdem sind die Eigenschaften und das Verhalten der in die Vorhäfen aus den Flüssen eingetragenen Sedimente zu beschreiben. Dabei geht es um die Entstehung und Zusammensetzung von Flüssigschlick. Von besonderem Interesse waren die Beprobungen und Analysen von Flüssigschlicksschichten in den Hafenbecken. Untersucht wurden die mit der Tiefe veränderlichen Dichten, Zähigkeiten, Feststoffgehalte und biologischen Anteile der Suspensionen bis hin zur festen Sohle.

2 Untersuchungsgebiete und Tideverhältnisse

Die Untersuchungen wurden an der Ems, Weser und Elbe in Emden, Bremerhaven und am Nord-Ostsee-Kanal bei Brunsbüttel durchgeführt (Abb. 1). Da die Gezeiten an der deutschen Nordseeküste ständigen periodischen und aperiodischen Veränderungen unterworfen sind macht es Sinn, für vergleichende Betrachtungen langjährige Mittelwerte der Tidewasserstände heranzuziehen (NLWKN, 2007).

Die Zufahrten zum Überseehafen in Bremerhaven liegen in einem Abstand von rd. 1 km am rechten Weserufer (Abb. 3). Die Solltiefe der Weser ist in diesem Stromabschnitt auf -16,02 m NN festgelegt (Abb. 4). Die Solltiefen in den Vorhäfen betragen -12,92 m NN vor der Nord- und -8,92 m NN vor der Kaiserschleuse. Sie liegen damit 3,10 m bzw. 7,10 m höher als die Wesersohle. Die Kaiserschleuse wurde an gleicher Stelle durch einen Neubau mit einer Länge von 305 m und 55 m Breite ersetzt und am 29. April 2011 eingeweiht.

Der rd. 2 km oberhalb der Kaiserschleuse gelegene Vorhafen zur Fischereihafenschleuse hat eine Solltiefe von -7,92 m NN (Abb. 5). Die Unterweser ist dort auf -15,12 m NN ausgebaut. Die Geesteeinfahrt liegt außerhalb des Prallhangs am Blexer Bogen und weist nur Solltiefen von rd. -7 m NN auf.

Für den zehnjährigen Zeitraum 1995/2004 gelten für den bei Weser-km 66,7 gelegenen Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm (Abb. 3) folgende Tidekennwerte:

Tidekennwerte Bremerhaven Alter Leuchtturm	
Mittleres Tidehochwasser	$MThw_{1995/2004} = 680 \text{ cm NN -4,98 m}$
Mittleres Tideniedrigwasser	$MTnw_{1995/2004} = 308 \text{ cm NN -4,98 m}$
Mittleres Tidehalbwasser	$MT_{\frac{1}{2}w}_{1995/2004} = 494 \text{ cm NN -4,98 m}$
Mittlerer Tidehub	$MThb_{1995/2004} = 372 \text{ cm}$

Seit 2005 wird das Seekartennull (SKN) nicht mehr auf das mittlere Springtideniedrigwasser (MSpTnw), sondern auf die Nodaltide (LAT = Lowest Astronomical Tide) bezogen. Das neue Seekartennull (LAT) liegt in Bremerhaven auf -2,62 m NN (WSD NORTHWEST, 2007). Bezogen auf den Pegel Alter Leuchtturm liegt dieser Wert mit $SKN = 236 \text{ cm NN -4,98 m}$ 72 cm unter dem $MTnw_{1995/2004}$. Der Oberwasserabfluss der Weser am Pegel Intschede (Abb. 1) beträgt im langjährigen Mittel $MQo_{1941/2004} = 327 \text{ m}^3/\text{s}$.

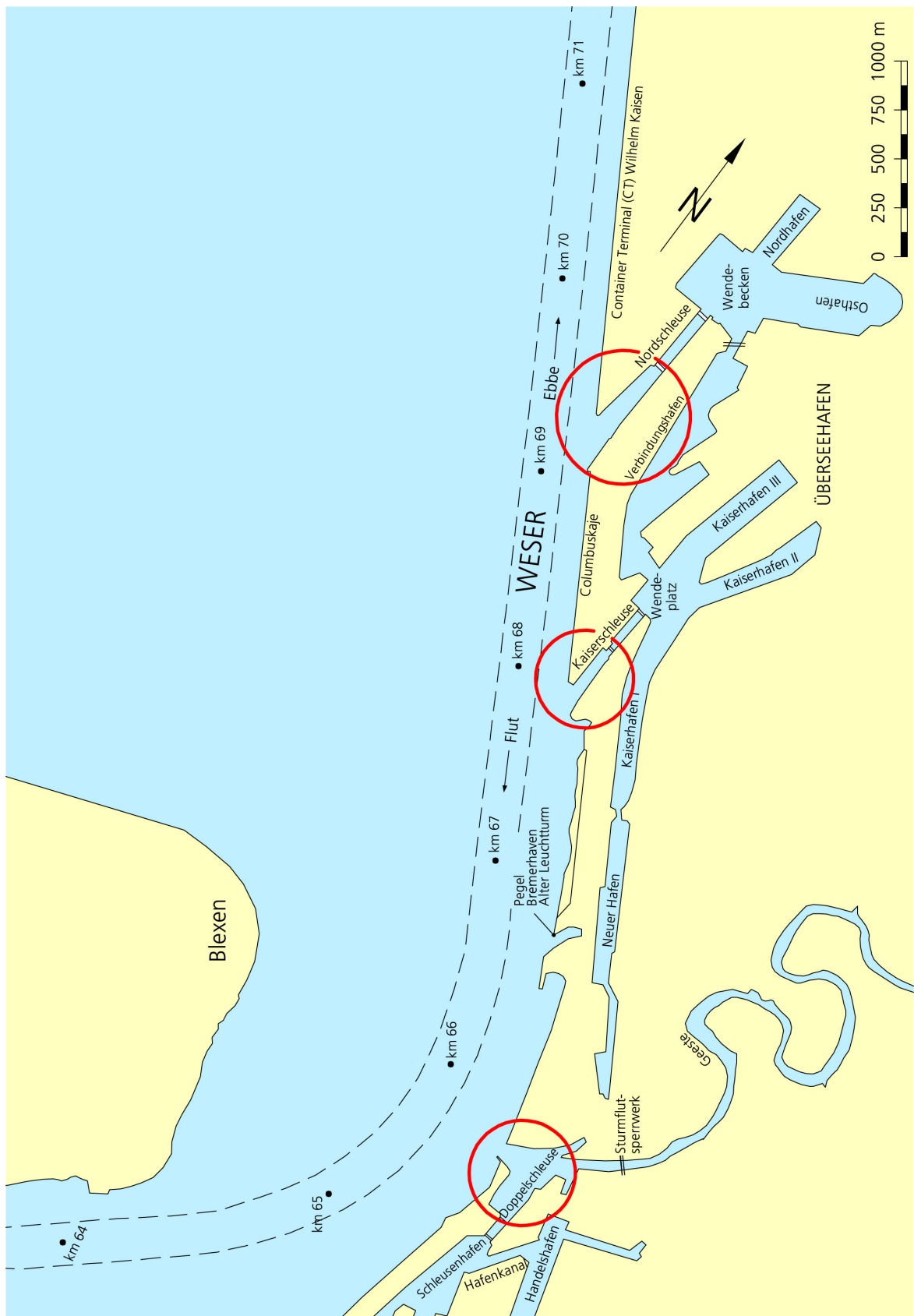


Abb. 3: Hafenanlagen von Bremerhaven

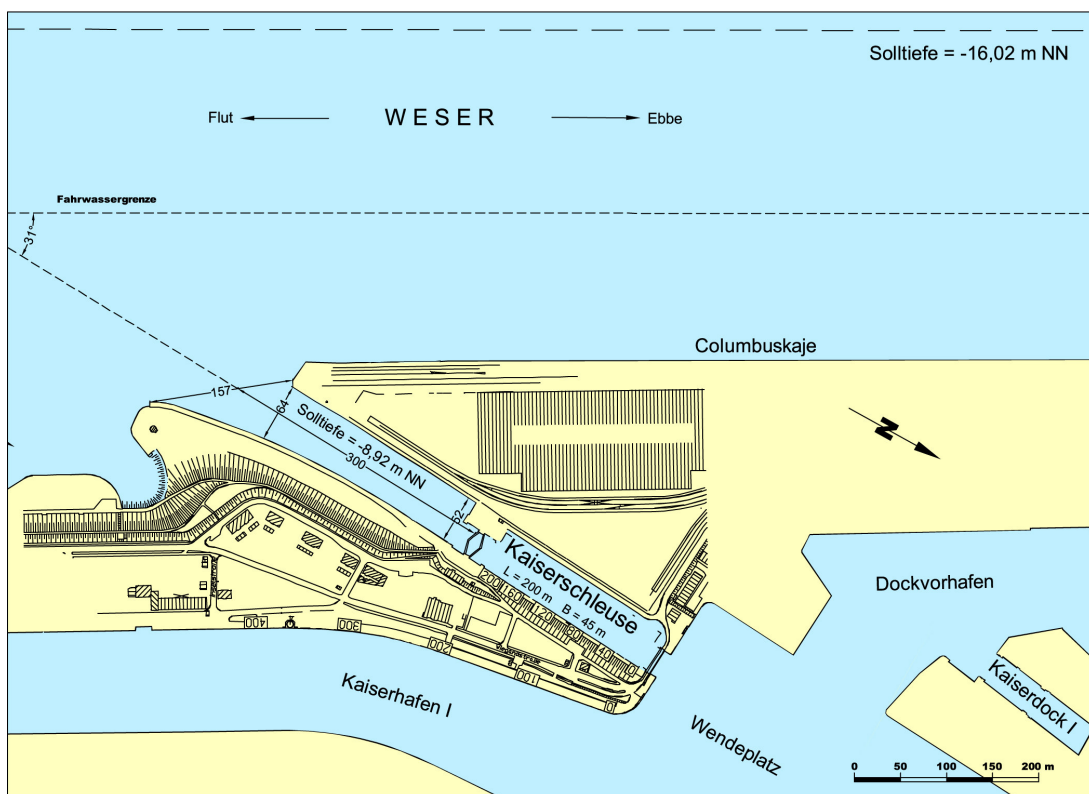
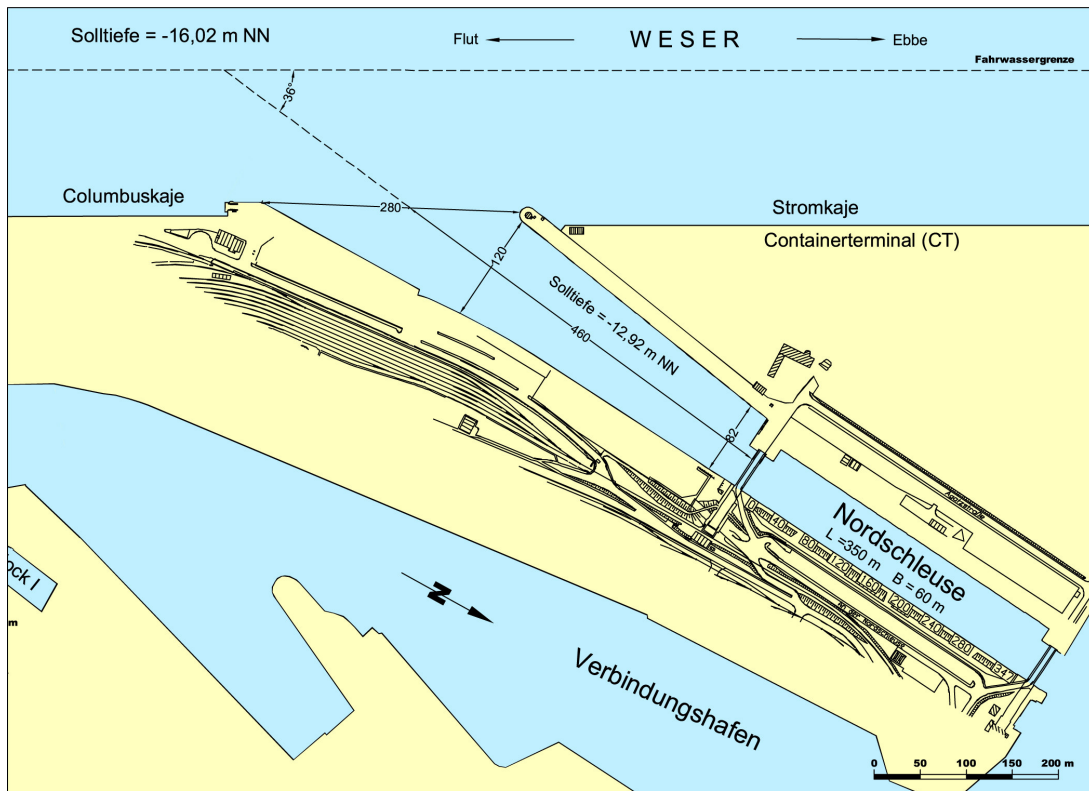


Abb. 4: Nord- und Kaiserschleuse in Bremerhaven

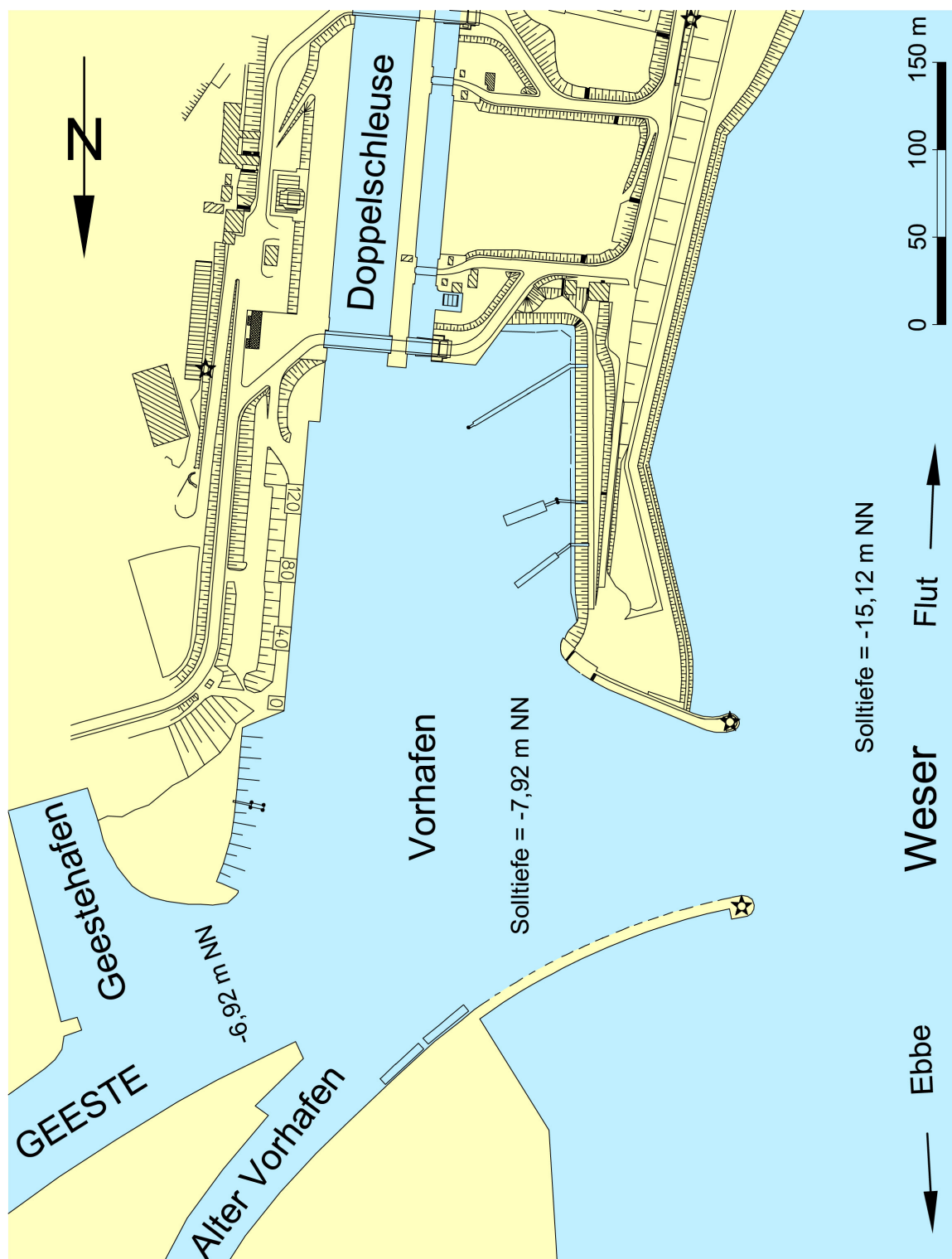


Abb. 5: Fischereihafenschleuse in Bremerhaven

Die Ems ist bis zur Emder Hafeneinfahrt auf -10,50 m NN ausgebaut (Abb. 6). Die Solltiefe im Vorhafen der Seeschleuse beträgt -11,60 m NN und ist damit 1,10 m tiefer als die Emssohle. Der Außenhafen ist auf -10,50 m NN ausgebaut und vor der Nesserlander Schleuse auf -6,10 m NN. Für den bei Ems-km 40,5 gelegenen Pegel Emden Neue Seeschleuse (Abb. 6) werden folgende Tidekennwerte im Gewässerkundlichen Jahrbuch angegeben (NLWKN, 2007):

Tidekennwerte Emden Neue Seeschleuse

Mittleres Tidehochwasser	MThw _{1995/2004} =	648 cm NN -5,00 m
Mittleres Tideniedrigwasser	MTnw _{1995/2004} =	329 cm NN -5,00 m
Mittleres Tidehalbwasser	MT $\frac{1}{2}$ w _{1995/2004} =	489 cm NN -5,00 m
Mittlerer Tidehub	MThb _{1995/2004} =	319 cm

Das in Emden auf LAT=-2,38 m NN festgelegte Seekartennull (WSD NORTHWEST, 2007) liegt 67 cm unter dem MTnw_{1995/2004}. Am Pegel Versen (Abb. 1) beträgt der mittlere Oberwasserabfluss der Ems MQ_{O1941/2004} = 80,4 m³/s.

Auch die Zufahrten zum Nord-Ostsee-Kanal liegen am rechten Flussufer (Abb. 7). Die Ausbautiefe der Elbe beträgt dort -15,86 m NN, die Sohle des Neuen Vorhafens -11,90 m NN und im Alten Vorhafen liegt sie bei -8,40 m NN. Wie bei der Nord- und Kaiserschleuse in Bremerhaven sind auch die Ausbautiefen in den Vorhäfen zum Nord-Ostseekanal um mehrere Meter höher als in der angrenzenden Unterelbe.

Nach Auskunft des Wasser- und Schifffahrtsamtes (WSA) Cuxhaven gelten für den Pegel Brunsbüttel Mole 4 folgende langjährigen Mittelwerte:

Tidekennwerte Brunsbüttel Mole 4

Mittleres Tidehochwasser	MThw _{1995/2004} =	650 cm NN -5,00 m
Mittleres Tideniedrigwasser	MTnw _{1995/2004} =	369 cm NN -5,00 m
Mittleres Tidehalbwasser	MT $\frac{1}{2}$ w _{1995/2004} =	510 cm NN -5,00 m
Mittlerer Tidehub	MThb _{1995/2004} =	281 cm

Nach WSD NORD (2007) liegt das LAT in Brunsbüttel auf -1,90 m NN und damit 59 cm unter dem MTnw_{1995/2004}. Der am Pegel Neu Darchau gemessene mittlere Oberwasserabfluss der Elbe beträgt MQ_{O1941/2004} = 703 m³/s.

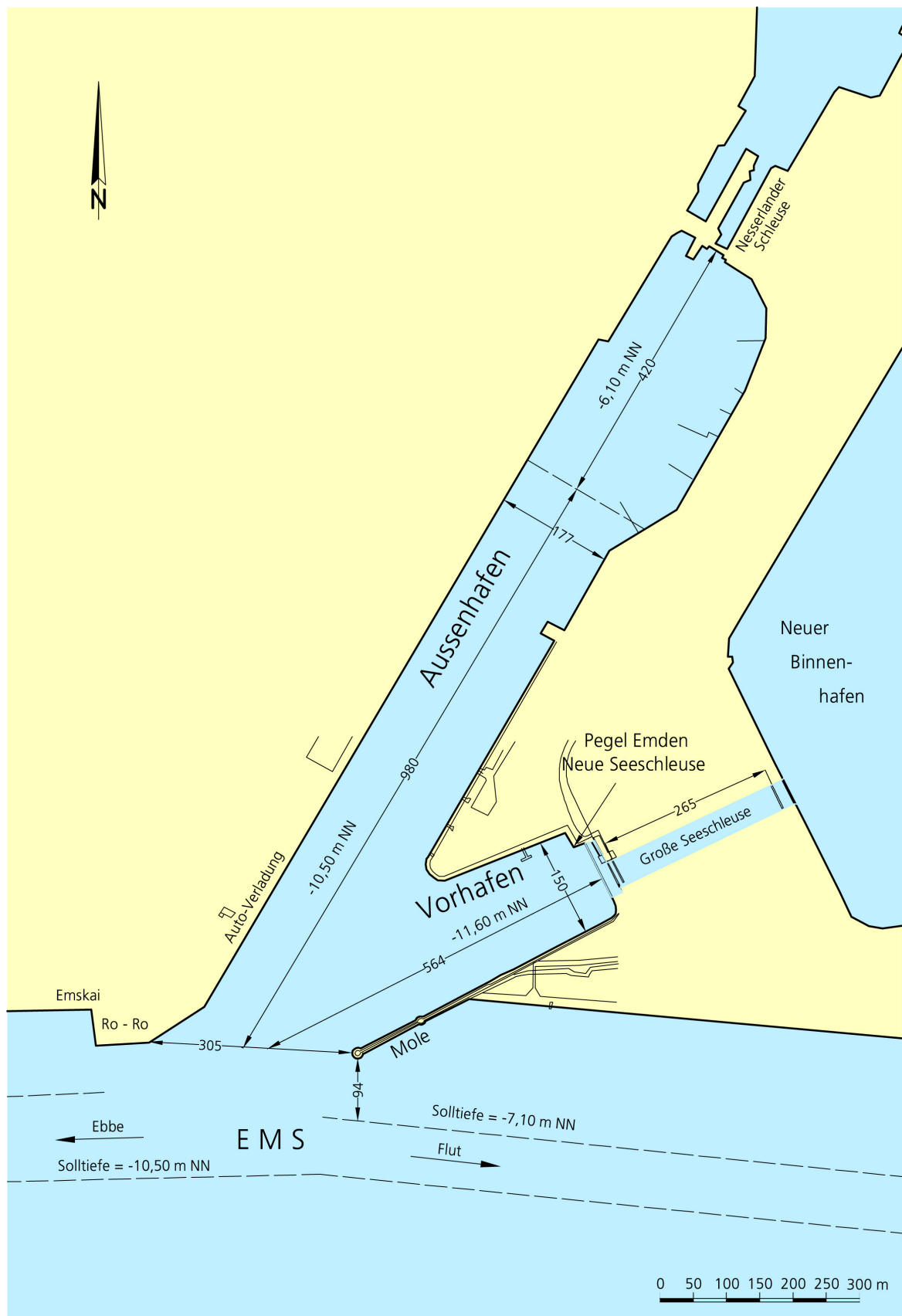


Abb. 6: Lageplan des Emdener Vor- und Außenhafens

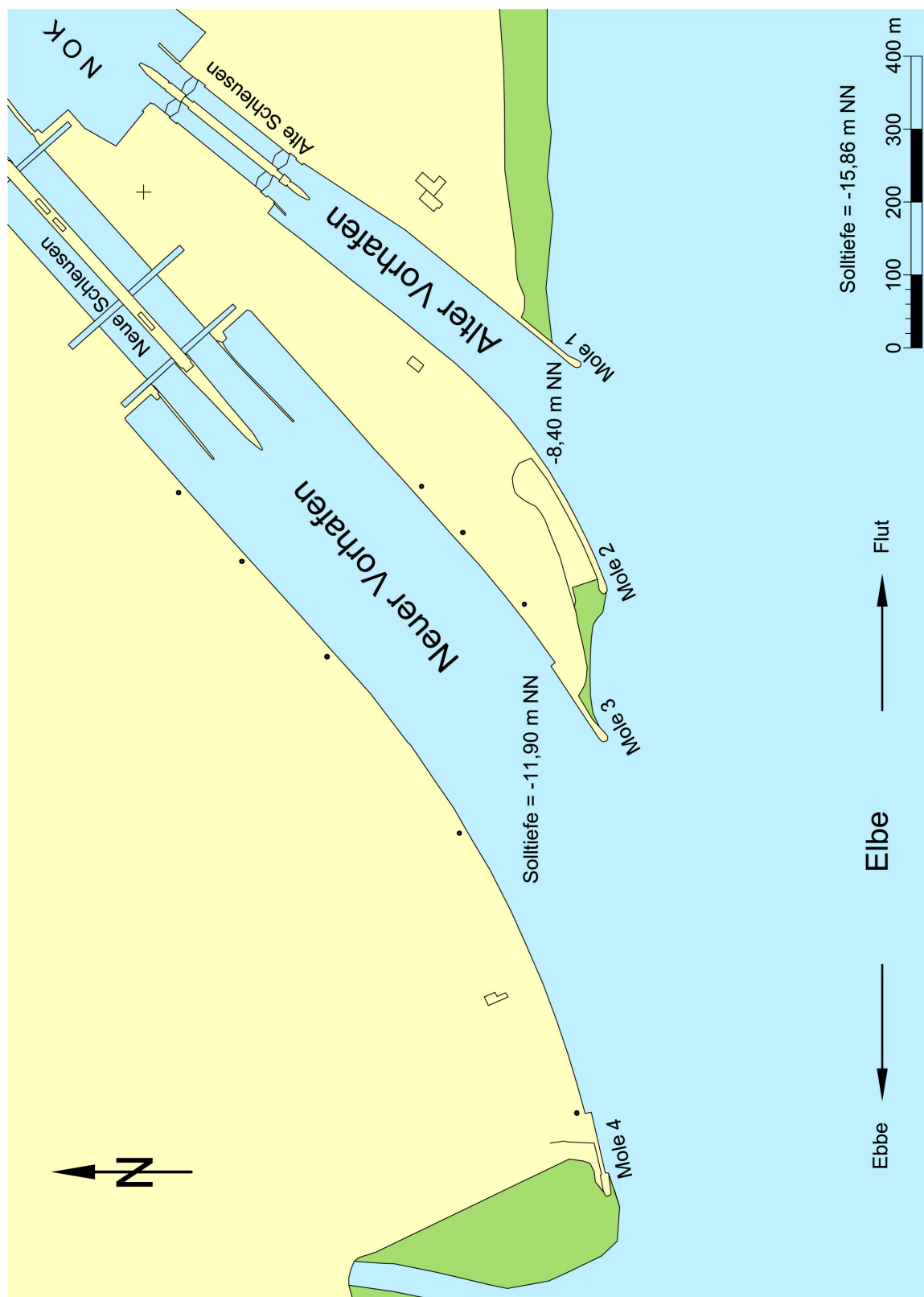


Abb. 7: Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal in Brunsbüttel

3 Anmerkungen zu den in situ Messungen

Die Strömungen wurden vom IWA mit einer ADCP-Sonde (**A**coustic **D**oppler **C**urrent **P**rofiler) gemessen. Das Messprinzip kann wie folgt kurz erläutert werden.

Von der Sonde werden akustische Schallimpulse mit einer hohen Frequenz (600 kHz) gesendet. Der Impuls wird von Partikeln im Wasser reflektiert. Die Bewegungen der Wasserteilchen verursachen Frequenzänderungen der Schallwelle (Dopplereffekt). Bewegt sich das Teilchen auf die Schallquelle zu, wird vom Gerät eine erhöhte Frequenz empfangen. Umgekehrt ist es wenn sich das Teilchen von der Sonde entfernt.

Der Dopplereffekt wird mit ADCP Sonden genutzt, indem Schallimpulse mit einer festen Ausgangsfrequenz gesendet und empfangen werden. Gleichzeitig kommt es zu Reflexionen mit den im Wasser befindlichen, bewegten Partikeln. Diese Dopplerverschiebung F_d ist proportional zur Geschwindigkeit v der Wasserteilchen. Dabei erfährt der Schallimpuls zweimal die Dopplerverschiebung. Einmal auf dem Weg zum Partikel und einmal vom Partikel zurück zum ADCP (Abb. 8).

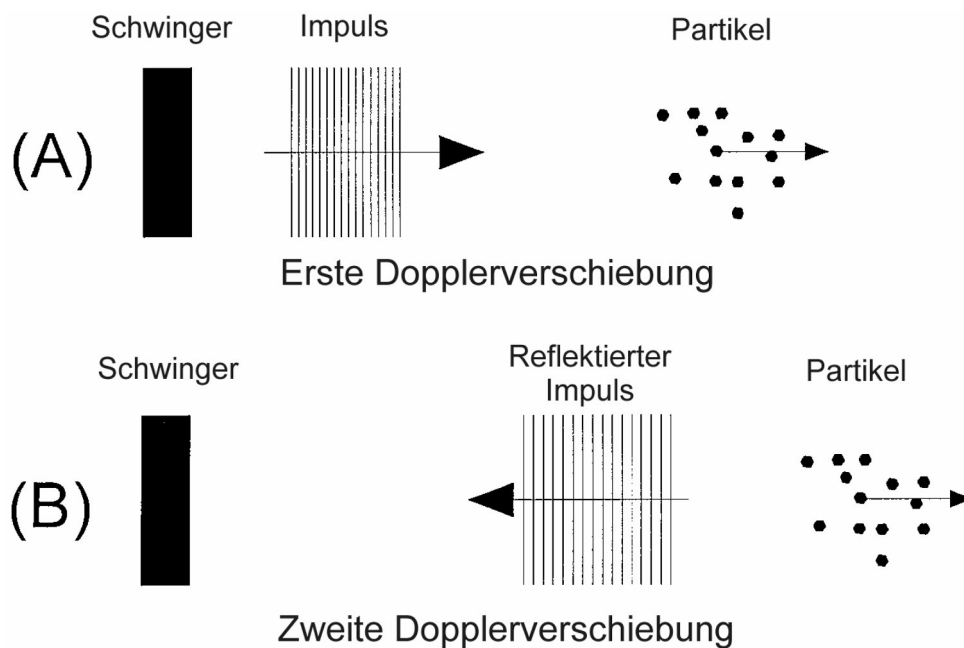


Abb. 8: Erste und zweite Dopplerverschiebung des Schallimpulses (GORDON, 1996)

Aus der Frequenzänderung kann die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden. Die Gleichung für die Dopplerverschiebung lautet

$$F_d = F_s \left(\frac{v}{c} \right)$$

mit F_d = Doppler Verschiebungsfrequenz

F_s = Ausgangsfrequenz des ADCP

v = Strömungsgeschwindigkeit der Teilchen

c = Geschwindigkeit des Schallimpulses

Um die Strömungen eindeutig nach Richtung und Geschwindigkeit definieren zu können sind vier Impulsgeber (Schwinger) erforderlich. Mittels eingebautem Kompass werden die Lage der Strömungsvektoren bestimmt. Mit ADCP ist es möglich, die Strömungen im Querprofil simultan über die Wassertiefe zu ermitteln. Die Tiefenmessung erfolgt in Segmenten gleicher Schichtdicke (z. B. ein Meter).

In der oberen und unteren Wasserschicht sind bis zu etwa einem Meter wegen fehlender Doppereffekte (no backscattering) keine Signale zu empfangen). Bei einer Eintauchtiefe der Sonde von 0,35 m wurde dem obersten Messbereich von 1,35 m bis 2,35 m die mittlere Wassertiefe von 1,85 m zugeordnet. Ausgehend von der oberen Tiefenzelle sind die Strömungen mit einer im IWA entwickelten Software nach Richtung und Stärke in Meterabständen ausgewertet worden. In den folgenden Abbildungen sind die ADCP-Geschwindigkeitsvektoren zur besseren Übersicht in 2m-Abständen dargestellt worden.

Neben den Strömungsverhältnissen wurden zusätzlich die tideabhängigen Salzgehalte und Schwebstoffkonzentrationen in der Natur mit einer Multifunktionssonde untersucht. Die Salzgehalte werden über Leitfähigkeitsmessungen ermittelt und auf Salzgehalte $S[\text{‰}]$ umgerechnet.

Die tideabhängigen Schwebstoffkonzentrationen wurden mit einer mobilen Sonde über die Lichtdurchlässigkeit ermittelt. Die Messung der Lichtschwächung (Attenuation) mit der ME-Sonde ist eine indirekte Methode zur Bestimmung des Schwebstoffgehaltes im Wasser. Mit Sensoren, die aus einer Lichtquelle und einem Empfänger bestehen wird die Lichtschwächung gemessen, die der Lichtstrahl entlang der Messstrecke erfährt. Die Lichtschwächung wird durch Absorption und Streuung verursacht. Die Absorption findet an gelösten oder farbigen Stoffen statt. Bei der Streuung an Partikeln verändert der Lichtstrahl seine Intensität und ursprüngliche Richtung. Für jede Suspension existiert eine Streufunktion, die nicht nur von der Konzentration, sondern auch von der Partikelgröße und -form abhängt. Eine Proportionalität ist nur bei konstanter Partikelzusammensetzung gewährleistet. Veränderliche Fraktionierungen können daher zu beträchtlichen Schwankungen der Ergebnisse führen.

Die Attenuation folgt dem Gesetz von LAMBERT-BEER:

$$A = 1 - \frac{l}{l_0} = 1 - e^{-x \cdot c}$$

mit x = Weglänge des Lichtes

l = Lichtintensität nach Weglänge x

l_0 = Anfangsintensität des Lichtes

c = Attenuationskoeffizient

Der dimensionslose Quotient $\frac{l}{l_0}$ gibt die Transmissionsrate des Lichtes an und wird vom Sensor direkt in % gemessen. Der Attenuationskoeffizient c ergibt sich zu:

$$c = \frac{-1}{x \cdot \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)} \left[\frac{1}{m} \right] \text{ mit } x = 20mm$$

Der Zusammenhang zwischen gemessener Attenuation und Schwebstoffgehalt muss also durch die vergleichende Entnahme und Auswertung von Wasserproben hergestellt werden.

4 Messungen in Bremerhaven

Die morphologischen Verhältnisse im Bereich der Hafenzufahrten in Bremerhaven von Strom-km 65 bis 71 sind in Abb. 9 dargestellt. Vor der Nord- und Kaiserschleuse wurden jeweils fünf Querprofile mit der ADCP-Sonde aufgenommen.

Die geringen Wassertiefen vor der Columbuskaje und gleichzeitige Verlagerung des Talweges lassen den geübten Betrachter der Abb. 9 die Flut- und Ebbewege der Tideströmungen erkennen.

Die sich an das tiefe Wasser der Stromkaje „anlehenden“ Flutströmungen werden im Zufahrtsbereich zur Nordschleuse nach Westen umgelenkt. Die Fahrwassertiefen nehmen gleichzeitig zwischen Nord- und Kaiserschleuse bis unter -14 m SKN ab. Umgekehrt werden die Ebbewassermengen unterhalb des Blexer Bogens ebenfalls nach Westen abgelenkt um dann dem Talweg folgend sich im Bereich der Nordschleuse wieder zum tiefen Wasser am östlichen Ufer vor der Stromkaje zu bewegen.

Die im Einfahrtsbereich der Westmolen von Nord- und Kaiserschleuse gelegenen Staupunkte der Flutströmungen weisen die stärkeren Ablagerungen bei der Nordschleuse auf (Profil 2 Nordschleuse und Profil 3 Kaiserschleuse in Abb. 9). Ursächlich dafür sind die größeren Abmessungen und stärkeren Strömungseffekte im Bereich der Nordschleuse. Die morphologischen Randbedingungen lassen dort auch stärkere Flutströmungen in der Weser erwarten. Die Einfahrt der Kaiserschleuse liegt im Schatten der Flutströmungen oberhalb der Columbuskaje bei insgesamt geringeren Wassertiefen gegenüber der Nordschleuse.

4.1 Bremerhaven Nordschleuse

4.1.1 Strömungen in der Weser

- **Flutströmungen**

Bei den Flutstrommessungen am 25. April 2005 lagen am Pegel Intschede mit $Q_o=383 \text{ m}^3/\text{s}$ etwa mittlere Oberwasserverhältnisse vor. Am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm betrug der Springtidehub $Thb = 426 \text{ cm}$ Abb. 10. Mit den Messungen wurde jeweils an der Columbuskaje (Profil 1) begonnen. Der Zeitbedarf für einen Umlauf betrug 15 bis 22 Minuten.

In Abb. 10 und Abb. 11 sind die Strömungsvektoren der ADCP-Messungen von der letzten Ebbestromphase bis zum voll ausgeprägten Flutstrom dargestellt. Bei den ersten Messungen (1 und 2) sind die ebbestromorientierten Dichteströmungen in der Hafeneinfahrt noch gut auszumachen. In der oberen Tiefenzelle strömt das Wasser in den Vorhafen und in 7,85 m Tiefe entgegengesetzt zur Weser.

Die Ebbestromkenterung setzte im tiefen Wasser nach dem Eintritt des Thw ein (Abb. 10, Messung 1). An der Oberfläche wurden gleichzeitig noch Ebbestömungen bis zu $v_e > 100 \text{ cm/s}$

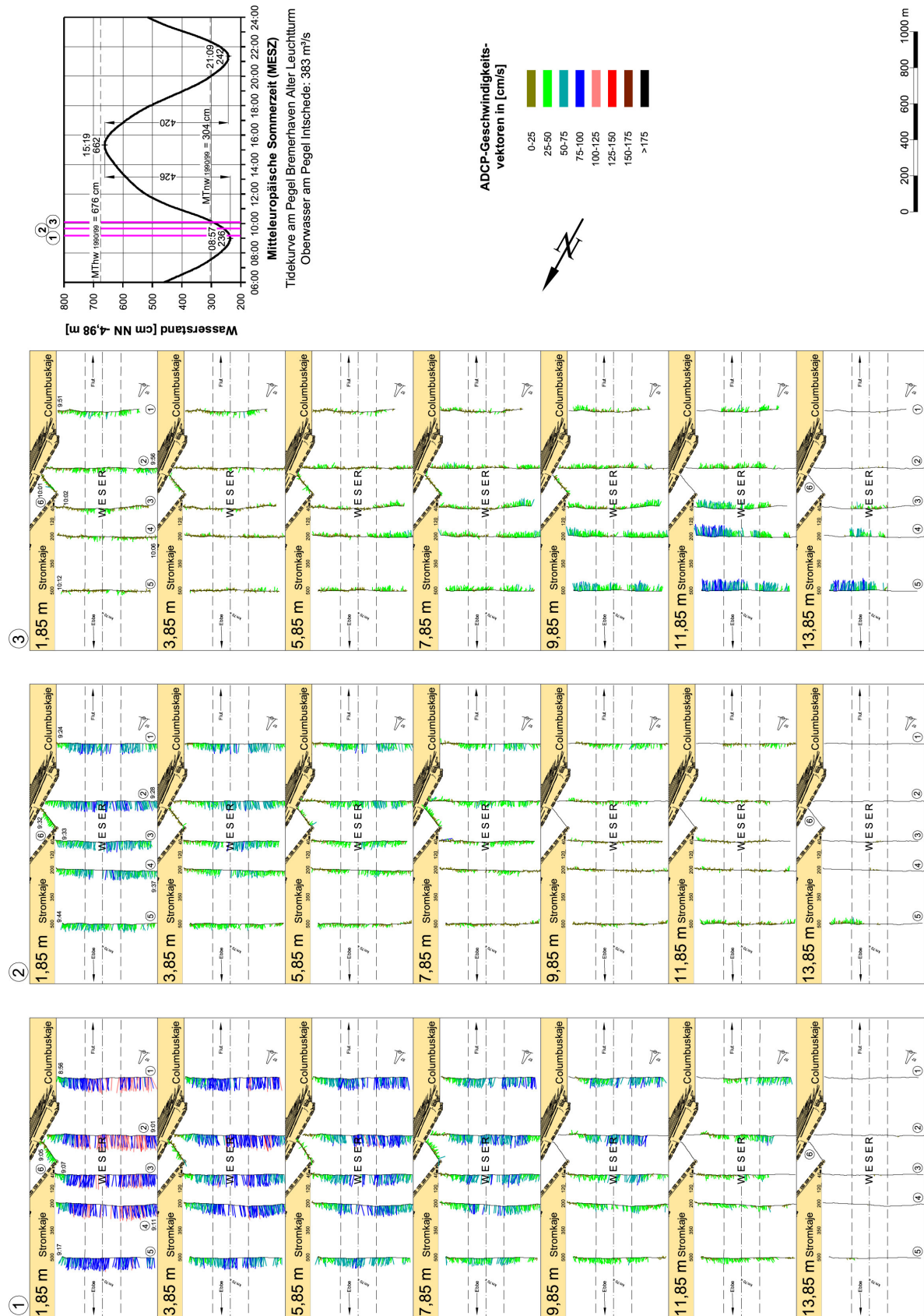


Abb. 10: Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 25.04.2005, Ebbestromkenterung und 1. Flutphase

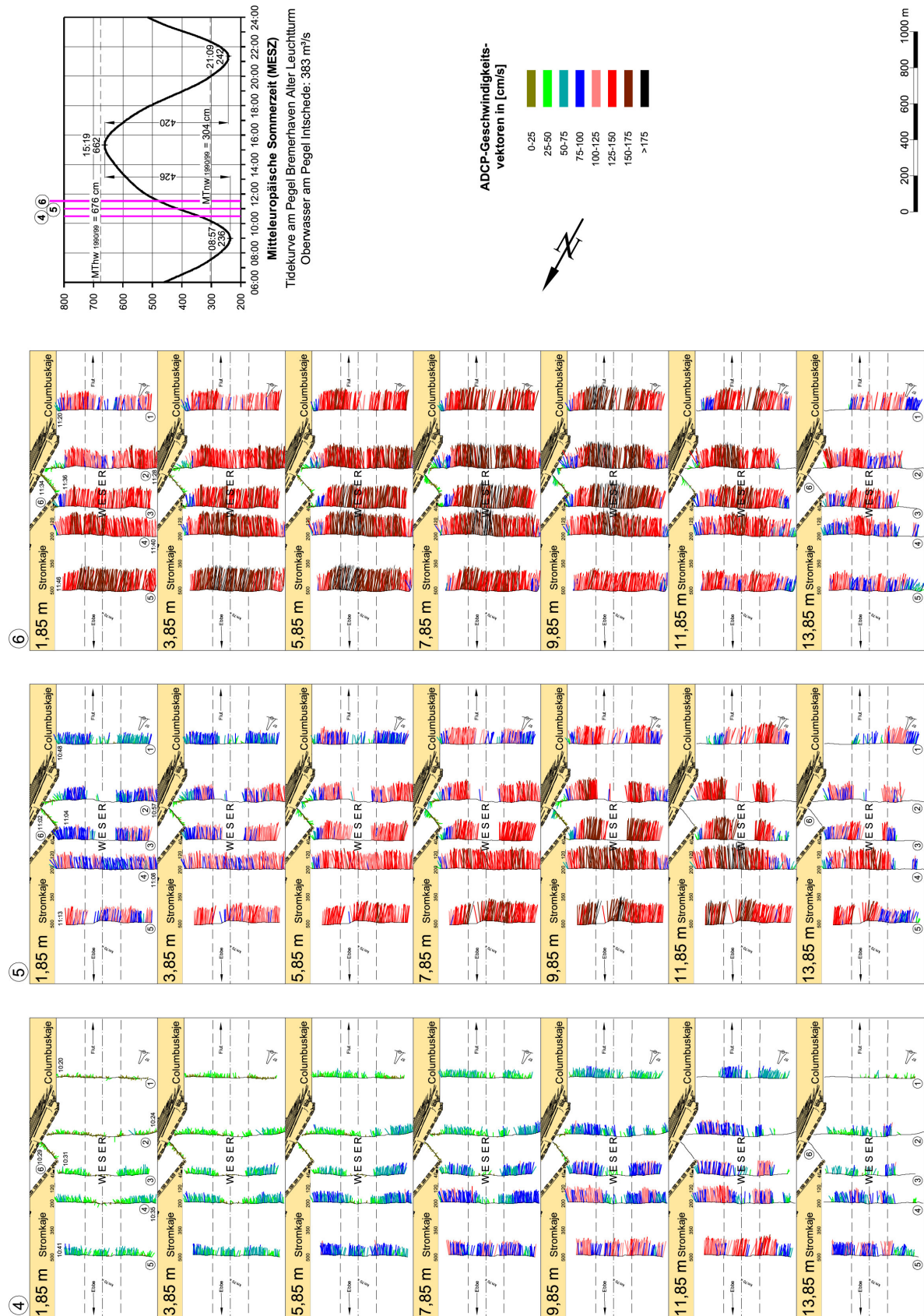


Abb. 11: Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 25.04.2005, 2. Flutphase

gemessen. Die Strömungsumkehr dauerte bereits etwa eine Stunde bis die oberen Wasserschichten erreicht wurden (Abb. 10, Messung 3). Zu diesem Zeitpunkt wurden über der Sohle vor der Stromkaje bereits Flutstromgeschwindigkeiten bis zu $v_f \approx 1$ m/s registriert. Die Flut setzte sich zuerst im östlichen (rechten) Weserquerschnitt an der Stromkaje durch. Dichtebedingt wird das in die Weser eindringende Salzwasser dort im tieferen Querschnittsbereich (vgl. Abb. 9) stromauf geführt

Die Entwicklung der Flutstromgeschwindigkeiten nach abgeschlossener Strömungsumkehr kann mit Abb. 11 nachvollzogen werden. Bemerkenswert und morphologisch bedeutend sind die in der ersten Flutstromphase starken Sohlströmungen in der Weser (Abb. 11, Messungen 4 und 5). Die maximalen Strömungen sind eindeutig in den tieferen Wasserschichten auszumachen. Etwa bei Tidehalbwasser (Messung 6 in Abb. 11) werden die stärksten Flutströmungen erreicht. Es wurden Geschwindigkeiten von bis zu $v_{fmax} > 200$ cm/s aufgezeichnet. Für die in der ersten Flutphase hohen Tideströmungen ist weniger der Tidehub als vielmehr der steile Anstieg des Flutastes und das damit verbundene stärkere Gefälle ausschlaggebend.

An den ADCP-Profilen ist zu erkennen, wie sich die Strömungen verlagern. Die stärksten Flutströmungen sind in den unteren Tiefenzellen der Abb. 11 im unteren Profil 5 im Fahrwasser und östlich davon anzutreffen. Bei den oberhalb gelegenen Profilen werden die Flutwassermengen mehr im westlichen Querschnitt stromauf transportiert. Naturbedingt stellt sich die Strömungsverteilung den geometrischen und morphologischen Vorgaben entsprechend ein.

Zu den Strömungs- und Dichteeffekten ist anzumerken, dass zu Beginn der Flutstromphase (Messung 4 in Abb. 11) die flutorientierten Walzenströmungen noch in den beiden oberen Tiefenzellen anzutreffen sind. Mit zunehmenden Salzgehalten im Tidestrom verlagern sich die Walzenströmungen in die tieferen Wasserschichten (Messungen 5 und 6 in Abb. 11). Mit dem Stromeffekt werden die Wassermassen unten in den Vorhafen eingetragen. Der Austausch mit dem Tidestrom findet durch die Rückströmungen aus den oberen Tiefenzellen statt. Die Überlagerungen der Tide-, Strömungs- und Dichteeffekte verstärkt sich noch in der folgenden Flutstromphase aufgrund der tideabhängig veränderlichen Salzgehalte.

Aus den ADCP-Messungen sind die Vertikalprofile der mittleren Strömungen im Fahrwasser der Weser berechnet worden. Sie sind für die vorstehend besprochenen ersten sechs Messungen in Abb. 12 dargestellt. Damit werden die hydrodynamischen Vorgänge im Untersuchungsgebiet von der ausklingenden Ebbestromphase bis zu den am stärksten ausgeprägten Flutströmungen veranschaulicht. Bereits in der ersten Flutstromphase sind in den sohlennahen Wasserschichten sehr beachtliche, morphologisch wirksame Flutstromgeschwindigkeiten zu verzeichnen. Die starken Geschwindigkeitsgradienten über der Gewässersohle belegen eindrucksvoll die hohe, dichtebedingte Transportkapazität der Strömungen in der ersten Flutstromphase. Sie sind ursächlich für den stromauf gerichteten Sedimenttransport im Untersuchungsbereich. In der dritten Stunde nach Thw, etwa bei Tidehalbwasser wurden die maximalen Flutströmungen beobachtet.

Die ADCP-Messungen der abklingenden Flutstromphase sind in Abb. 13 (Messung 7 bis 9) und Abb. 14 (Messung 10 bis 12) dargestellt. Mit sich abflachenden Flutast kommt es zu einer raschen Minderung der Strömungsgeschwindigkeiten (Abb. 13). Bei genauerer Betrachtung ist in

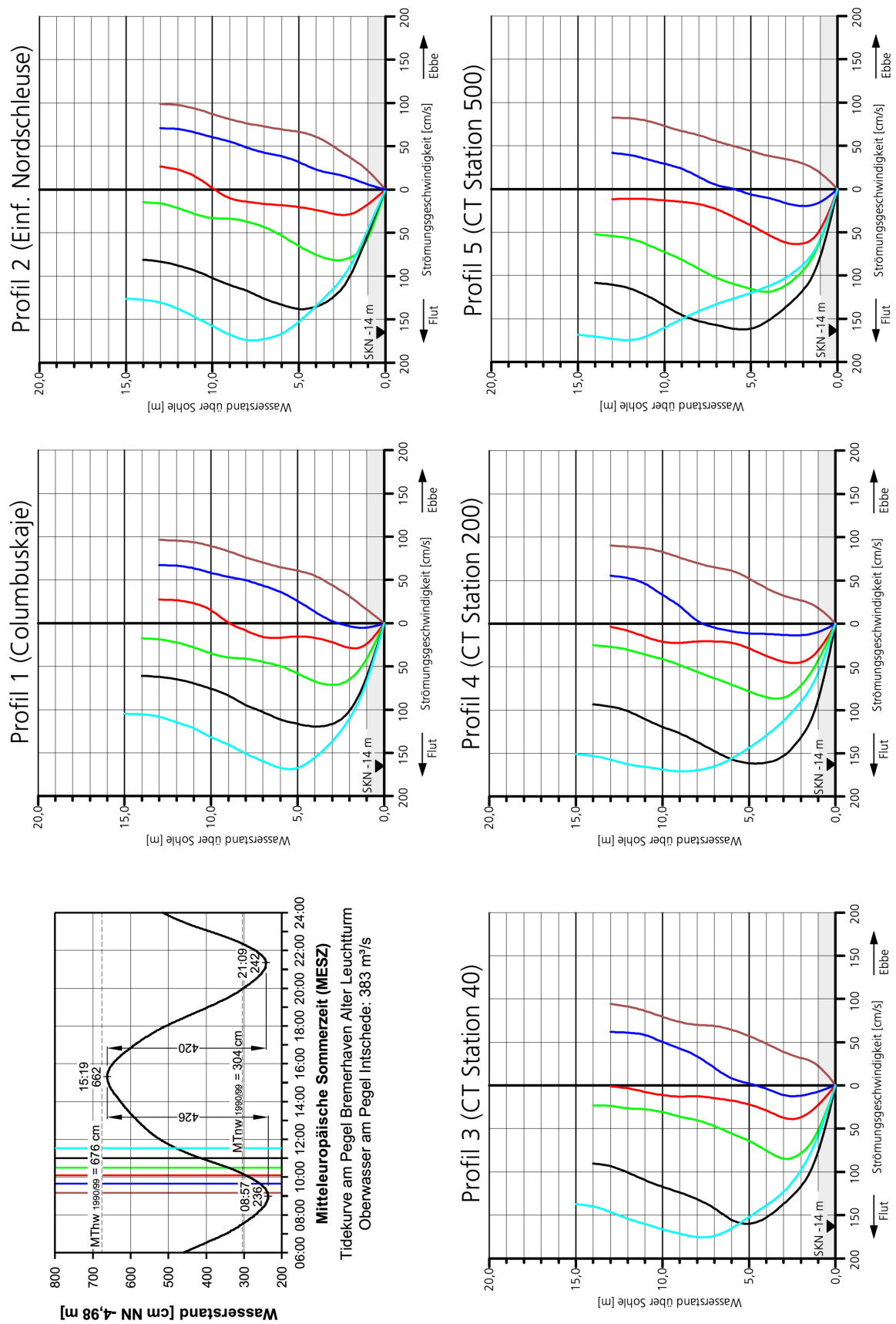


Abb. 12: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 25.04.2005

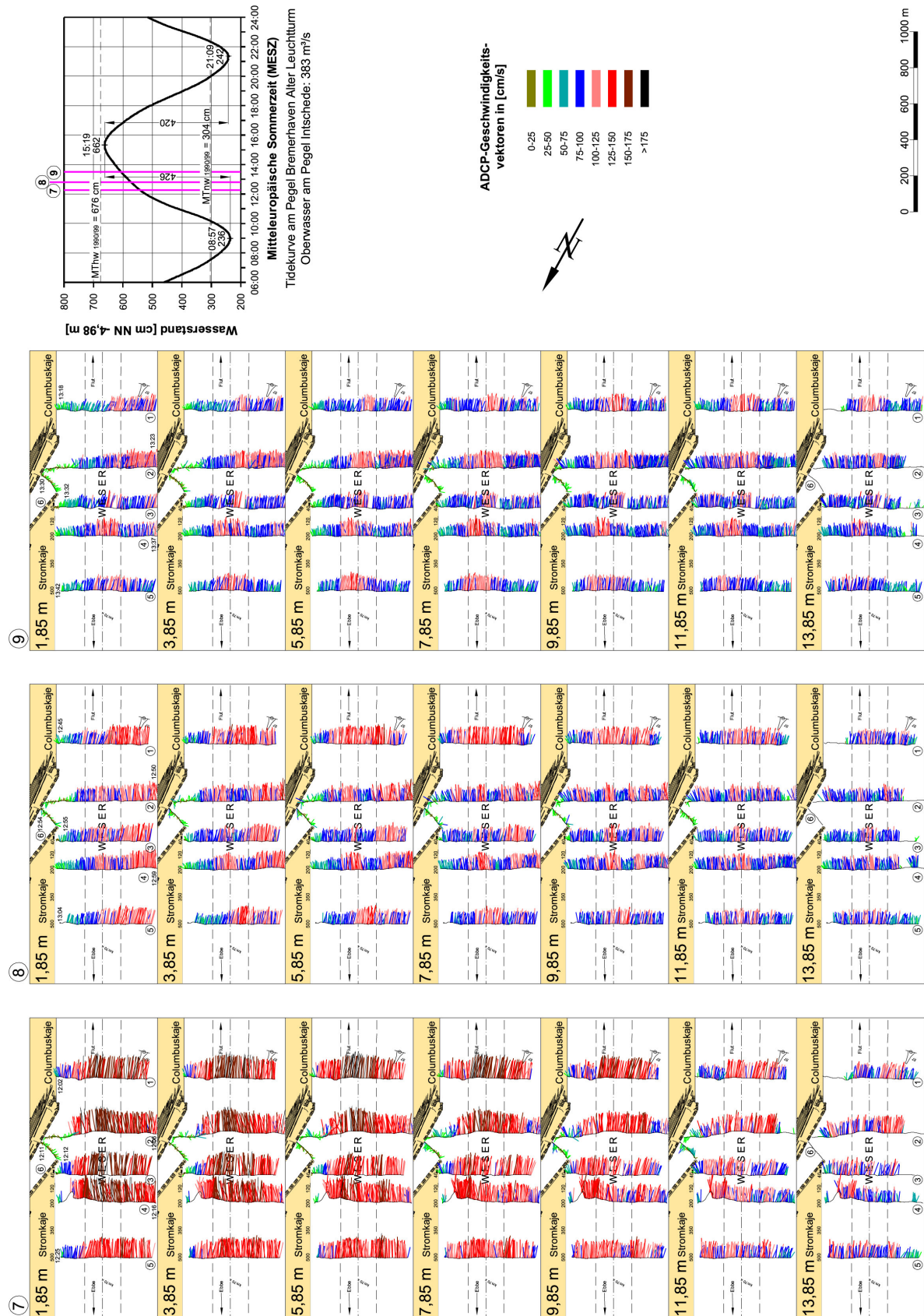


Abb. 13: Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 25.04.2005, 3. Flutphase

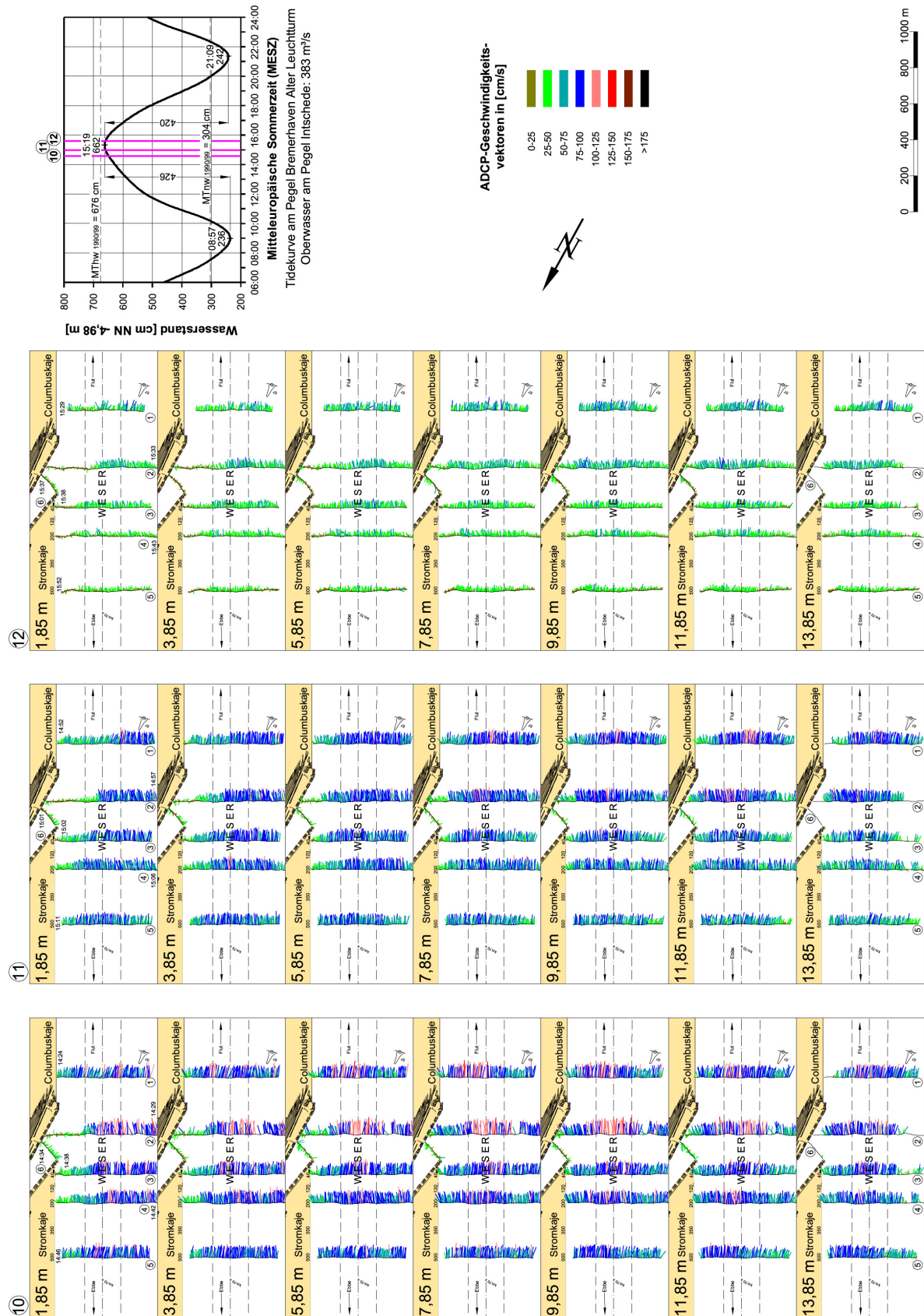


Abb. 14: Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 25.04.2005, 4. Flutphase

Abb. 13 zu erkennen, wie sich die Hauptströmungen zwischen Strom- und Columbuskaje von Ost nach West verlagern. Die sich in den Profilen 5 bis 1 dem Talweg entsprechend verändernde horizontale Geschwindigkeitsverteilung bleibt bis zum Eintritt des Thw besonders auffällig in den unteren Tiefenzellen bestehen (Abb. 14). Auffällig ist die mit zunehmender Flutstromdauer gleichmäßig werdende Geschwindigkeitsverteilung über die Wassertiefe (Abb. 13 und 14). Außerdem werden die Flutströmungen vor der Hafeneinfahrt mit fortschreitender Tidedauer in den oberen Wasserschichten durch den Wasseraustausch zwischen Vorhafen und Weser zunehmend bis über den rechten Fahrwasserrand hinaus beeinflusst. Mit den stärker ausgeprägten Dichteströmungen gelangen größere Wassermengen an der Oberfläche aus dem Vorhafen. In den tieferen Schichten wird das Wasser mit den linksdrehenden Flutstromwalzen in den Vorhafen eingetragen. Am Staupunkt der Ostmole kommt es zu Sedimentablagerungen (vgl. Abb. 9).

Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrwasser für die spätere Flutstromphase sind in Abb. 15 dargestellt. Nach Tidehalbwasser hatten sich die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten bis zur Wasseroberfläche verlagert. Auffällig ist der geringe Vertikalgradient der Flutströmungen vor der Stromkaje (Profile 3 bis 5 in Abb. 15). Die etwas anderen Profile in den oberen Wasserschichten an der Vorhafeneinfahrt (Profil 2) und dem Nordende der Columbuskaje (Profil 1) sind auf Austauschvorgänge zwischen Vorhafen und Weser sowie den veränderten morphologischen Bedingungen zurückzuführen.

• Ebbeströmungen

Bei etwa mittlerem Oberwasserbedingungen ($Q_o = 281 \text{ m}^3/\text{s}$ in Intschede) betrug der Nipptidefall der Vormittagstide vom 18. April 2005 251 cm.

Die ersten Messungen in Abb. 16 (Messung 1 bis 3) zeigen die ausklingende Flutphase bis zur einsetzenden Flutstromkenterung.

Auch bei der Nipptide sind die Strömungs- und dichtebedingten Austauschvorgänge zwischen Fluss und Schleusenvorhafen in Abb. 16 zu erkennen. Bei den ersten beiden Messungen ist in den tiefen Zellen (9,85 m und 11,85 m) die links drehende Flutstromwalze und die Einstromung in den östlichen Vorhafen auszumachen. Wie bei der Flutmessung werden die Strömungen in der Weser vor der Einfahrt in den oberen Wasserschichten durch die Rückströmungen bis zur Fahrwassergrenze beeinflusst (vgl. Abb. 14).

Die etwa einstündige Kenterung hat während der 2. Messung in den oberen Tiefenzellen begonnen und setzte sich langsam bis in die unteren Bereiche durch (Messung 3). Bis zur 4. Messung (Abb. 17) hatte sich in den oberen Wasserschichten, verstärkt im Fahrwasser und westlich davon, der Ebbestrom durchgesetzt. Im weiteren Tideverlauf nehmen die Ebbestromgeschwindigkeiten kontinuierlich zu, bis etwa bei Tidehalbwasser die Maximalwerte erreicht werden (Abb. 17 und 18). Mit Abb. 18 ist gut nachvollziehbar, wie sich die Ebbeströmungen vom unteren Ende der Columbuskaje zur Stromkaje den morphologischen Randbedingungen entsprechend von West nach Ost verlagern.

Im Profil 1 zeigen die Strömungsvektoren, dass die Ebbestromgeschwindigkeiten im Fahrwasser und westlich davon stärker sind als vor der Columbuskaje. Das ist auf die geringen Sohliefen

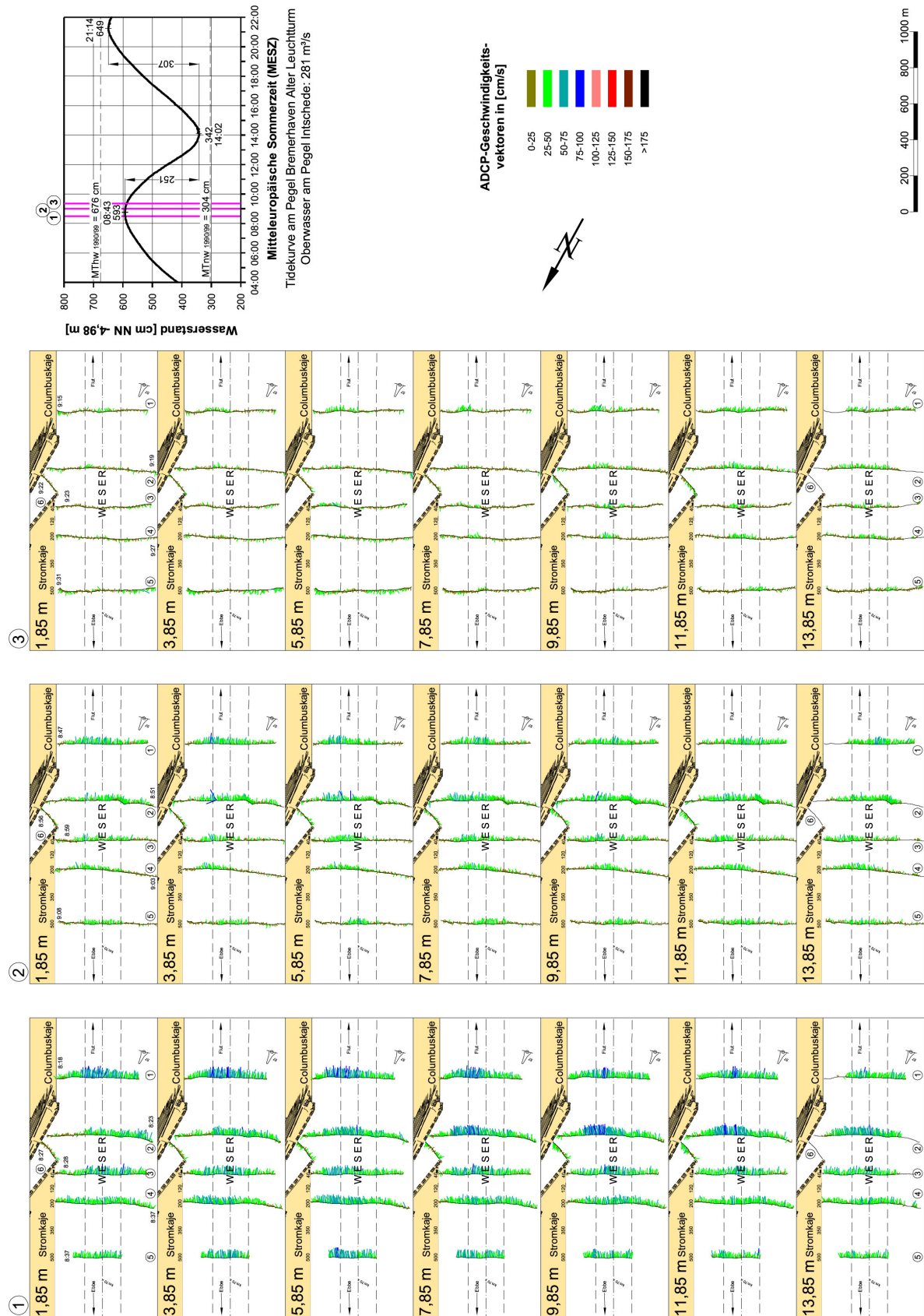


Abb. 16: Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 18.04.2005, 1. Ebbephase

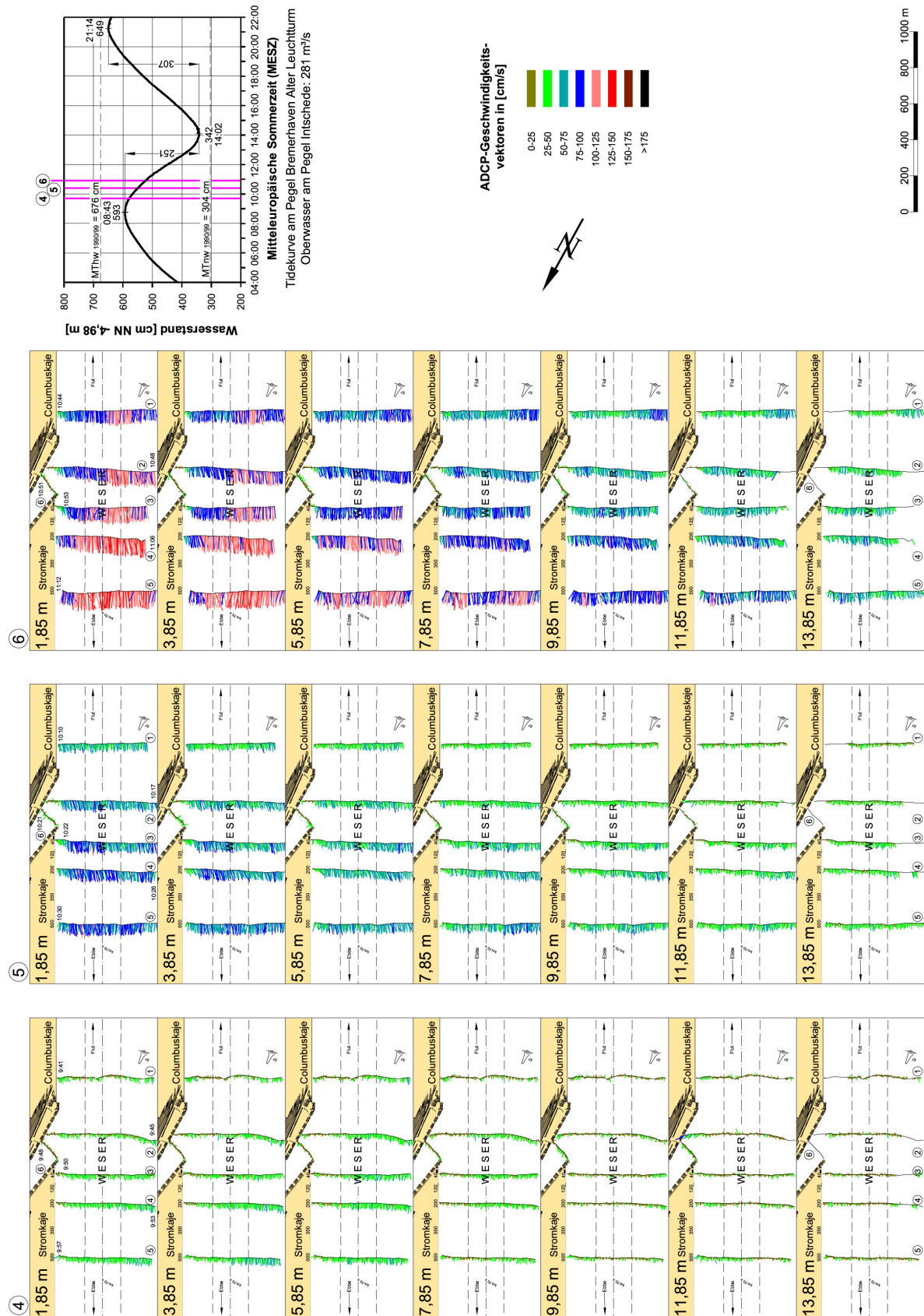


Abb. 17: Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 18.04.2005, 2. Ebbephase

vor der Kaje zurückzuführen. Weiter unterhalb (Profil 2) wirken sich die Austauschvorgänge zwischen dem Vorhafen zur Nordschleuse und dem Tidestrom aus. Ab der 7. Messung bei Tidehalbwasser stellen sich die ebbestromorientierten Strömungseffekte ein. Oben strömen die Ebbewassermengen vom Staupunkt der Westmole in und weiter unten (7,85 m Tiefenzelle) aus dem Vorhafen. Unterhalb der Vorhafeneinfahrt lehnt sich die Ebbeströmung zunehmend an die Stromkaje an.

Bei der voll ausgeprägten Ebbestromphase wurden an der Oberfläche Geschwindigkeiten von $v_{max} > 175$ cm/s erreicht (Abb. 18). Bemerkenswert ist die deutliche Abnahme der Strömungsintensität bei Ebbe in den unteren Wasserschichten ab der 9,85 m Tiefenzelle.

Die über den Fahrwasserbereich gemittelten Geschwindigkeiten sind für die ersten 8 Profilmfahrten in Abb. 19 als Vertikalprofile aufgetragen. Typisch ist die gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung der Flutströmungen vor der Kenterung. Das spezifisch leichtere Oberwasser setzt sich bei der Strömungsumkehr zuerst in den oberen Wasserschichten durch. Etwa eine Stunde nach Thw war die Kenterung im untersten Profil 5 abgeschlossen.

Die anschließende Entwicklung zeigt die typischen Vertikalgradienten der Ebbestromgeschwindigkeiten im Brackwasserbereich. Durch den Einfluss des spezifisch leichteren Oberwassers sind die maximalen Geschwindigkeiten in den oberen Wasserschichten anzutreffen. Kennzeichnend ist auch der im Tideablauf zunehmende starke Geschwindigkeitsgradient im unteren Drittel.

Die in Abb. 20 aufgetragenen ADCP-Profile dokumentieren die späte Ebbestromphase bis zur Kenterung. Die Strömungsumkehr tritt zuerst im tiefen Wasser vor der Stromkaje ein (Messung 10). Auch eine Stunde nach Thw hatte sich die Kenterung noch nicht bis zu den oberen Zellen durchgesetzt (Messung 12).

Die in Abb. 21 aufgetragenen Vertikalprofile veranschaulichen das hydrodynamische Geschehen im Fahrwasser bis zur Kenterung. Erst in der letzten Stunde vor Thw werden die Ebbestromgeschwindigkeiten deutlich schwächer. Das salzhaltigere Wasser strömt an der Sohle bereits kurz nach Thw stromauf. Beachtenswert sind die bereits während des Kentervorgangs in den unteren Wasserschichten morphodynamisch sehr wirksamen Flutstromgeschwindigkeiten.

4.1.2 Salzgehalte

- **Flutstromverhältnisse**

Die Tide- und Oberwasserverhältnisse waren am 26.04.2005 ähnlich wie bei den ADCP-Messungen vom Vortag. Der Springtidehub betrug am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm $Thb = 432$ cm und das Oberwasser am Pegel Intschede $Q_0 = 352$ m³/s.

Die tideabhängigen Salzgehalte wurden für die in Abb. 22 eingetragenen fünf Positionen vom nördlichen Ende der Columbuskaje (Pos. 1) bis zur Station 500 der Containerkaje (Pos. 5) dargestellt. Bei allen Messungen nimmt die Salzkonzentration mit der Wassertiefe zu. Sie erhöhen sich während der Flutstromphase um $\Delta S \approx 10$ ‰.

Besonders auffällig ist der starke Vertikalgradient in der ersten Flutstromphase im tiefen Was-

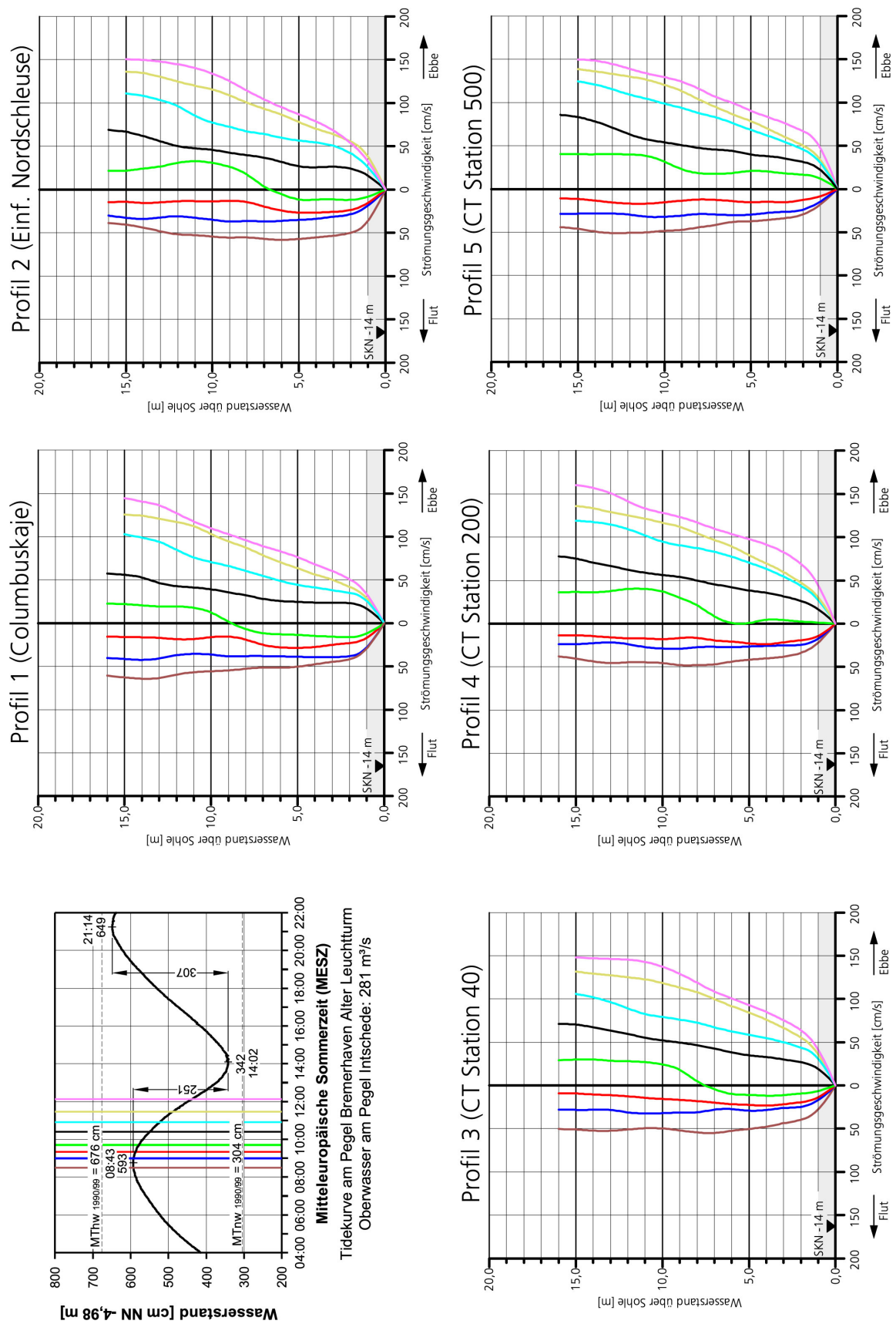


Abb. 19: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 18.04.2005

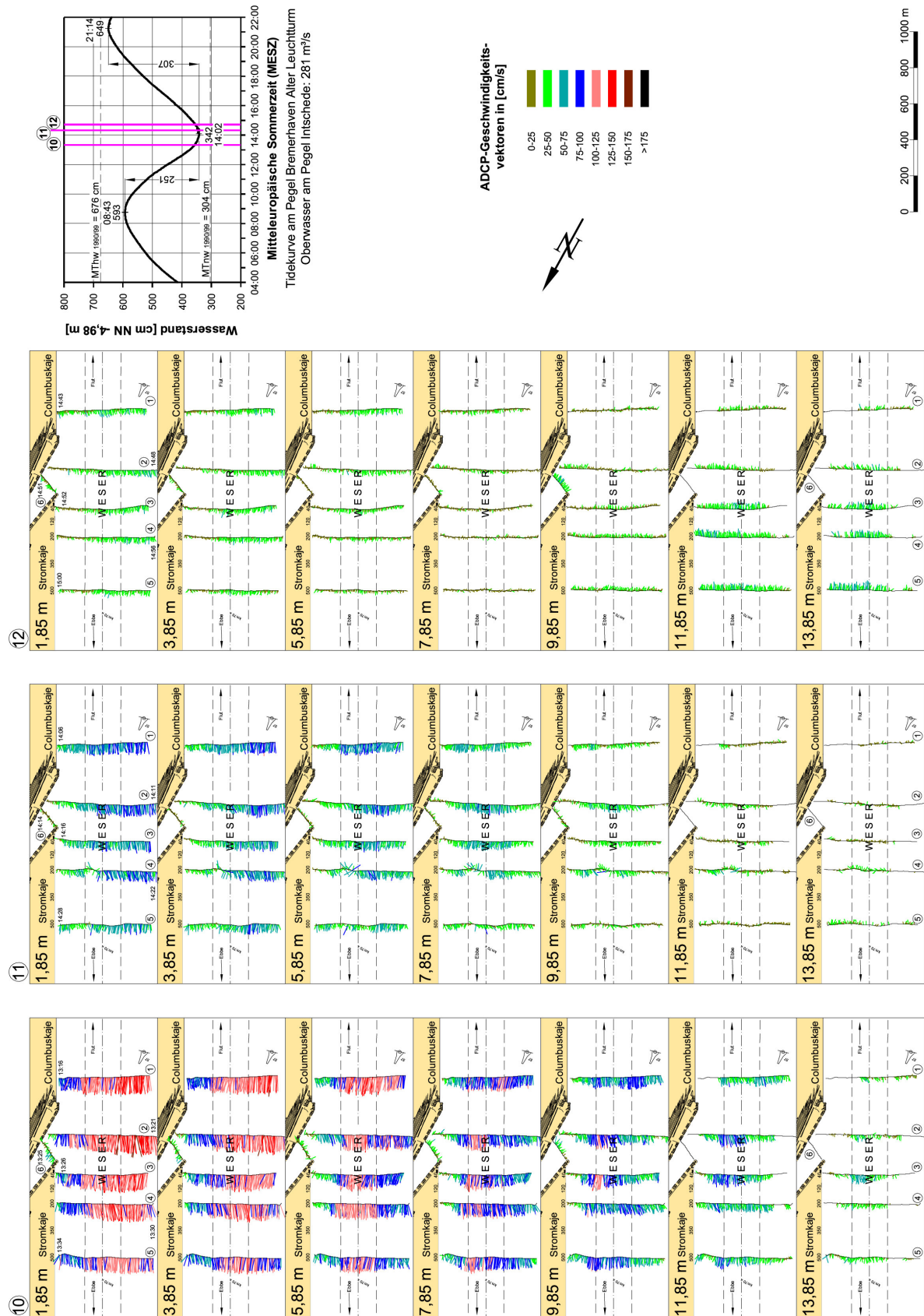


Abb. 20: Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 18.04.2005, 4. Ebbephase

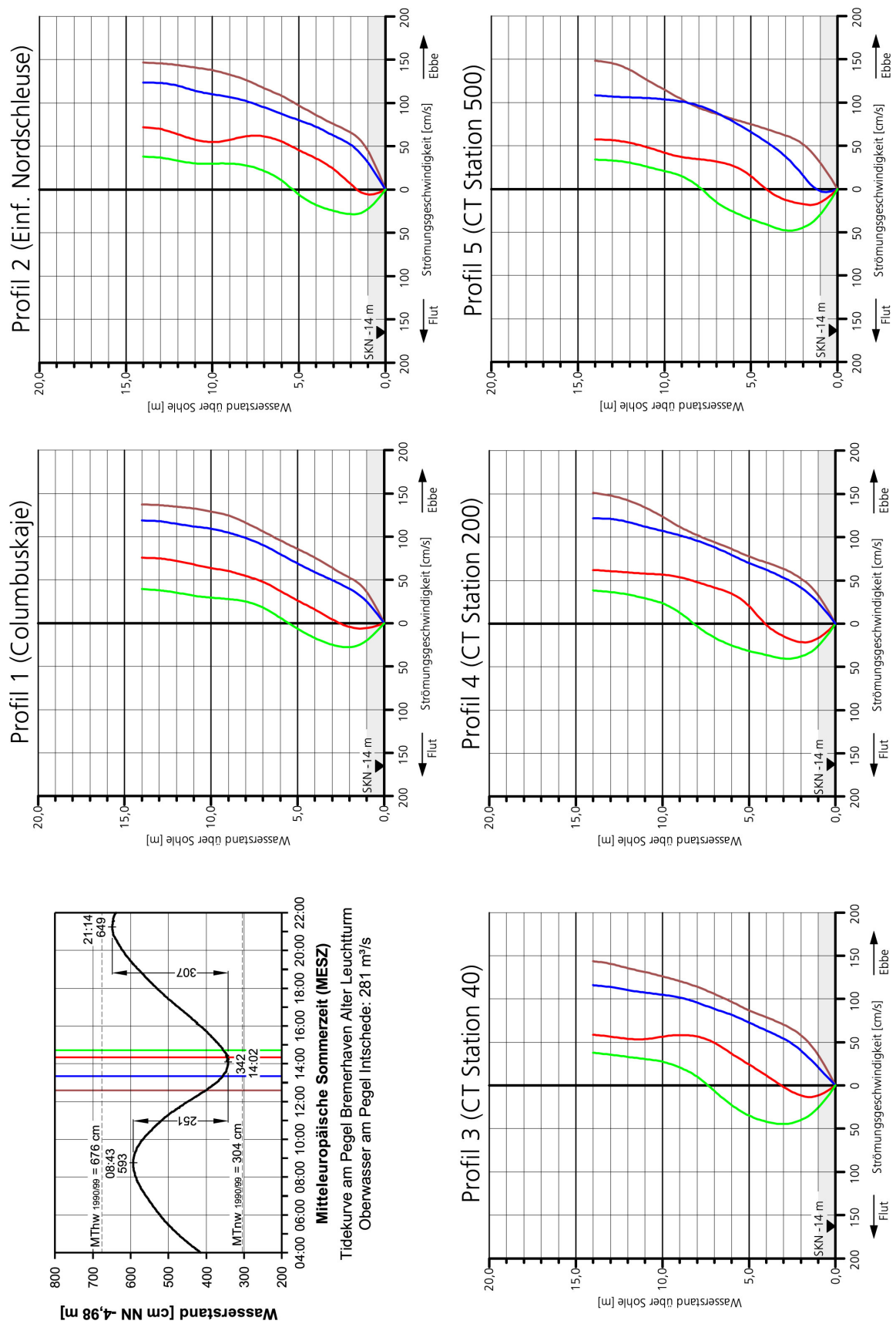


Abb. 21: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 18.04.2005

ser vor der Stromkaje (Pos. 5, Messung 2). Zwischen Oberfläche und Sohle betrug die Differenz $\Delta S = 6 \text{ ‰}$. Dies ist der Grund dafür, dass die maximalen Flutströmungen während des steilen Anstiegs des Flutastes über der Sohle festgestellt wurden. Daraus ergibt sich der stromauf gerichtete Geschiebetransport. Gleichzeitig vergrößert sich in diesem Tideabschnitt das horizontale Salzgehaltsgefälle zwischen Pos. 5 und 1 (Messung 2 und 3). Nach Tidehalbwasser entwickeln und stabilisieren sich die flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen im Vorhafen der Nordschleuse. Die Austauschvorgänge werden eindrucksvoll mit der Messung 3 veranschaulicht. Kennzeichnend ist der sprunghafte Übergang der Salzkonzentrationen an der Pos. 2. Die linksdrehenden Flutstromwalzen transportieren das Wasser an der Ostmole (Pos. 3) in den Vorhafen. Deshalb sind dort die Salzgehalte höher als an der Westmole (Pos. 4). Dieser Zustand bleibt bis zum Thw (Messung 6) im tiefen Wasser erhalten. Die Vertikalgradienten vor der Columbus- und Containerkaje (Pos. 1 und 5) werden mit fortschreitender Flut zunehmend schwächer. Dementsprechend vergleichmäßigte sich auch die Verteilung der Flutstromgeschwindigkeiten, so wie es die ADCP-Messungen gezeigt haben.

• Ebbestromverhältnisse

Die Salzgehaltsprofile in Abb. 23 zeigen bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser erwartungsgemäß ähnliche Verhältnisse wie bei der Flutmessung (vgl. Abb. 22). Bei Thw sind die Konzentrationen in der Vorhafeneinfahrt kleiner als in der Weser und bei Tnw ist es umgekehrt.

Während des Tidehochwassers bis zur Flutstromkenterung sind die Salzgehalte erwartungsgemäß bei Pos. 5 am höchsten (Messung 1 und 2). Von Bedeutung ist der Vertikalgradient. Im tiefen Wasser vor der Containerkaje sind die Konzentrationen um $\approx 2 \text{ ‰}$ höher als an der Wasseroberfläche. Das erklärt, die verstärkten Strömungen an der Sohle auch noch in der letzten Flutstromphase. Die etwas geringeren Salzgehalte in der Vorhafeneinfahrt sind auf die Austauschvorgänge zurückzuführen. In der letzten Flutstromphase (Messung 1) sind die Salzgehalte an der Ostmole (Pos. 3) höher als bei Pos. 4. Aufgrund der sich überlagernden Dichteströmungen wird in den oberen Wasserschichten phasenverschoben leichteres, salzärmeres Wasser aus dem Vorhafen transportiert.

Nach der Kenterung gleichen sich die Salzkonzentrationen in allen Profilen an (Messung 2). Mit sich voll ausprägenden Ebbeströmungen vermindern sich die Salzgehalte kontinuierlich.

Die sich ab $T\frac{1}{2}w$ ausprägenden Strömungs- und Dichteeffekte im Bereich des Vorhafens zeigen die Vertikalprofile ab Messung 3. Die Salzkonzentrationen in der Vorhafeneinfahrt (Pos. 3 und 4) folgen phasenverschoben den in der Weser gelegenen Positionen. Da die Ebbeströmungen an der Westmole in den Vorhafen eindringen, sind die Salzgehalte bei Pos. 4 geringer als an der Ostmole bei Pos. 3 (Messung 3 bis 6).

Während der Tideniedrigwasserphase (Messung 5 und 6) treten in der Weser geringere Konzentrationen als im Vorhafenbereich auf. Das salzhaltigere Wasser wird durch die Strömungs- und Dichteeffekte verzögert aus dem Vorhafen zur Weser transportiert (vgl. Abb. 22, Messung 1). Die natürlichen Vorgänge wurden bei der Ebbemessung mit einer Niedrigwasserschleusung durch das Schleusungswasser aus dem Überseehafen verstärkt (Abb. 23, Messung 5). Wegen der Zuwä-

serungen durch den Freilaufkanal bei hohen Weserwasserständen sind die Salzgehalte während der Niedrigwasserphase im Überseehafen höher als vor der Schleuse. Von den Austauschvorgängen wird auch noch das Nordende der Columbuskaje beeinflusst. Bemerkenswert ist der starke vertikale Salzgradient im Profil 5 an der Stromkaje in den unteren Wasserschichten. Dort setzt sich die Flutströmung bereits kurz nach Thw zunächst an der Sohle durch.

4.1.3 Schwebstoffe

• Flutstromverhältnisse

Aus Abb. 24 ist zu entnehmen wie die Schwebstoffkonzentrationen nach Thw vor der Stromkaje bis $C_s < 150$ mg/l abnehmen (Pos. 5, Messung 1 und 2). Die höheren Feststoffgehalte im Bereich der Hafeneinfahrt sind auf die ebbeorientierten Austauschvorgänge zurückzuführen.

Aus der weiteren Entwicklung der Schwebstoffprofile an der Stromkaje (Pos. 5) lassen sich wertvolle Rückschlüsse auf den Sedimenttransport ziehen. Das hohe Transportvermögen der sohlennahen Flutströmungen (vgl. Abb. 12) führt zur raschen Schwebstoffanreicherung in den unteren Wasserschichten (Messung 2 und 3). Besonders hohe Turbulenzen sind bei $T\frac{1}{2}w$ (Messung 3) zu verzeichnen, als vor der Stromkaje noch bis in 6 m Wassertiefe Konzentrationen von $C_s \approx 650$ mg/l erreicht wurden.

Die ungleichmäßige Schwebstoffverteilung über die Wassertiefe blieb bei Pos. 5 bis zum Eintritt des Thw (Messung 6) erhalten. Bemerkenswert ist die starke Konzentrationszunahme in den unteren Wasserschichten und die durchgehend geringen Werte an der Oberfläche. Der Transport des Sohlenmaterials vor dem Containerterminal wird in der ersten Flutstromphase mobilisiert. Danach sind die nachlassenden Strömungsgeschwindigkeiten noch in der Lage, den Transport der Schwebstoffe bis zum Eintritt des Thw aufrecht zu erhalten.

• Ebbestromverhältnisse

Die Schwebstoffkonzentrationen waren in der letzten Flutstromphase vor der Stromkaje vergleichsweise gering (Messung 1, Pos. 5 in Abb. 25). Beachtenswert ist die Zunahme in den unteren Wassertiefen auf $C_s \approx 250$ mg/l. Das ist mit den in dieser Tidephase beobachteten Vertikalgradienten der Strömungen und Salzgehalte erklärt. Die höheren Schwebstoffgehalte im Bereich der Schleusenzufahrt mit den größeren Werten an der Ostmole (Pos. 3) ist auf die ausgeprägten Walzen- und Dichteströmungen zurückzuführen. Während der Flutstromkenterung (Messung 2) beruhigt sich das Schwebstoffgeschehen. Die mittleren Konzentrationen sinken an allen Positionen auf $C_s < 100$ mg/l ab.

In der Hauptebbestromphase (Messung 3 bis 5) sind die Schwebstoffkonzentrationen vor der Stromkaje (Pos. 5) gleichmäßiger als in der Flutstromphase über die Wassertiefe verteilt. Das ist auf die vorstehend beschriebene, brackwasserbedingte Minderung der Sohlströmungen bei Ebbe zurückzuführen. Merklich höhere Feststoffmengen sind ab Tidehalbwasser im Bereich der Schleusenzufahrt zu beobachten. Den rechtsdrehenden Walzenströmungen entsprechend sind dabei die höheren Konzentrationen bei den Pos. 2 und 4 zu verzeichnen.

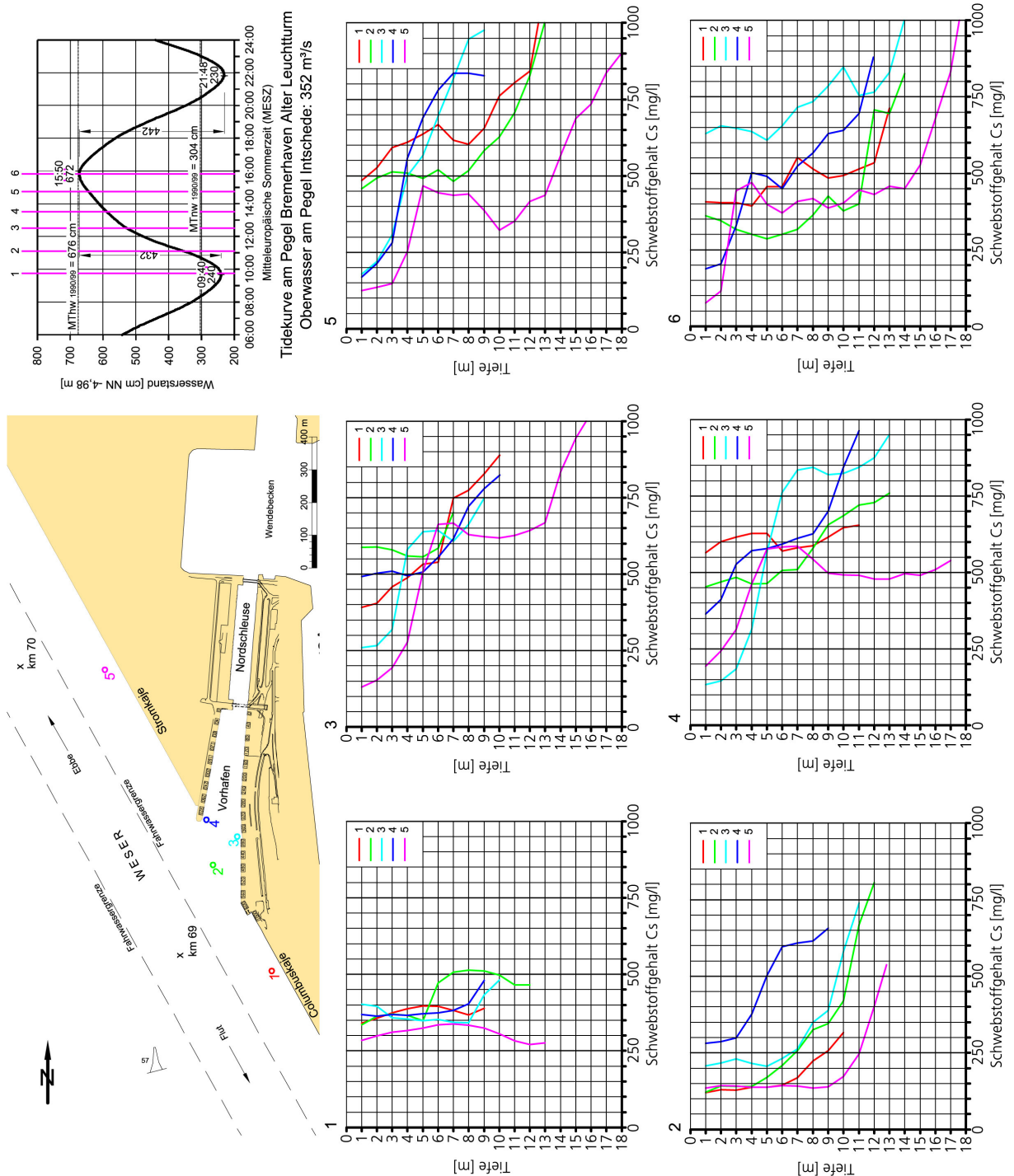


Abb. 24: Schwebstoffe im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, Flutmessung am 26.04.2005

Bei Tnw (Messungen 5 und 6) weisen die Schwebstoffe für Pos. 5 relativ geringe Konzentrationen bei sehr gleichmäßiger Verteilung über die Wassertiefe auf. Mit der letzten Messung wurde ein Feststoffgehalt von lediglich $C_s \approx 125 \text{ mg/l}$ festgestellt. Durch die dichtebedingte, sohlennahe Strömung aus dem Vorhafen wurden im Einfahrtsbereich noch bis zu $C_s \approx 250 \text{ mg/l}$ gemessen.

4.1.4 Strömungen im Vorhafen

• Flutströmungen

In Abb. 26 und 27 sind die Strömungsvorgänge bei etwa mittleren Oberwasserbedingungen ($Q_0 = 232 \text{ m}^3/\text{s}$) ab der Ebbestromkenterung aufgetragen. Der zugehörige Springtidehub betrug am Pegel Bremerhaven, Alter Leuchtturm 417 cm. Grundsätzlich ist anzumerken, dass bei den Untersuchungen auf den Schiffsverkehr Rücksicht zu nehmen war. Aus diesem Grund konnte das Vergleichsprofil in der Weser nicht regelmäßig aufgenommen werden.

Zur Kenterphase der Ebbeströmungen (K_e) in der Weser überwiegen im Vorhafen die Dichteströmungen (Abb. 26, Messung 1). Das Wasser strömt in den oberen Zellen (1,85 m und 3,85 m) mit abnehmender Intensität in und in den unteren Wasserschichten (ab 7,85 m) mit zunehmender Stärke aus den Vorhafen. Die absoluten Geschwindigkeiten betragen an der Oberfläche bis zu rd. 50 cm/s und im Sohlenbereich bis $v_{max} > 50 \text{ cm/s}$. In den mittleren Schichten (5,85 m) sind dagegen kaum Wasserbewegungen zu erkennen. Der niedrige Tidewasserstand und die aktuelle Sohllage im Vorhafen erklären die fehlenden Strömungsvektoren in den tiefen Zellen 11,85 m und 13,85 m. Mit Abb. 26 wird auch dokumentiert, wie sich die Strömungsumkehr in der Weser aufgrund der Dichteunterschiede von der Sohle aus zur Wasseroberfläche durchsetzt. Erst in der zweiten Stunde nach Tnw lösen sich die ebbestromorientierten Dichteströmungen im Vorhafen auf (Abb. 26, Messung 2).

Die Verstärkung der Sohlenströmung in der Weser durch das während der Flutstromphase von außen eindringende Salzwasser wirkt sich auf die Strömungsvorgänge im Vorhafen aus. Mit zunehmender Wassertiefe und höherer Strömungsenergie im Strom wird der Strömungseffekt bei voll ausgeprägtem Flutstrom mit den linksdrehenden Walzen im Einfahrtsbereich intensiviert (Abb. 26, Messung 3). Gleichzeitig beginnen sich im tieferen Wasser auch die flutstromorientierten Dichteströmungen auszubilden. In den unteren Tiefenzellen ist erkennbar, wie das Wasser von den Flutstromwalzen in der Einfahrt aus in den östlichen Vorhafen fließt. Am Ende des steilen Tidestiegs hat sich der Flutstrom voll ausgeprägt.

Die ab Tidehalbwasser ($T_{\frac{1}{2}w}$) im Vorhafen vorhandenen hydrodynamischen Gegebenheiten sind für die davon abhängigen morphologischen Vorgänge von entscheidender Bedeutung (Abb. 27). In den oberen Wasserschichten strömen die Wassermassen bei überwiegendem Dichteeffekt aus dem Vorhafen zurück in die Weser (Messung 4). Ab 5,85 m überlagern sich Strom- und Dichteeffekt mit nach unten zunehmender Stärke. Von den Flutstromwalzen aus strömt das Wasser sohlennah mit relativ hohen Geschwindigkeiten in den Vorhafen. Beachtenswert sind die sehr starken Strömungsvektoren über der Hafensohle von bis zu $v > 75 \text{ cm/s}$. Das führt zu hohen Schwebstofffrachten der überwiegend aus Schlämmkorn mit biologischen Anteilen bestehenden

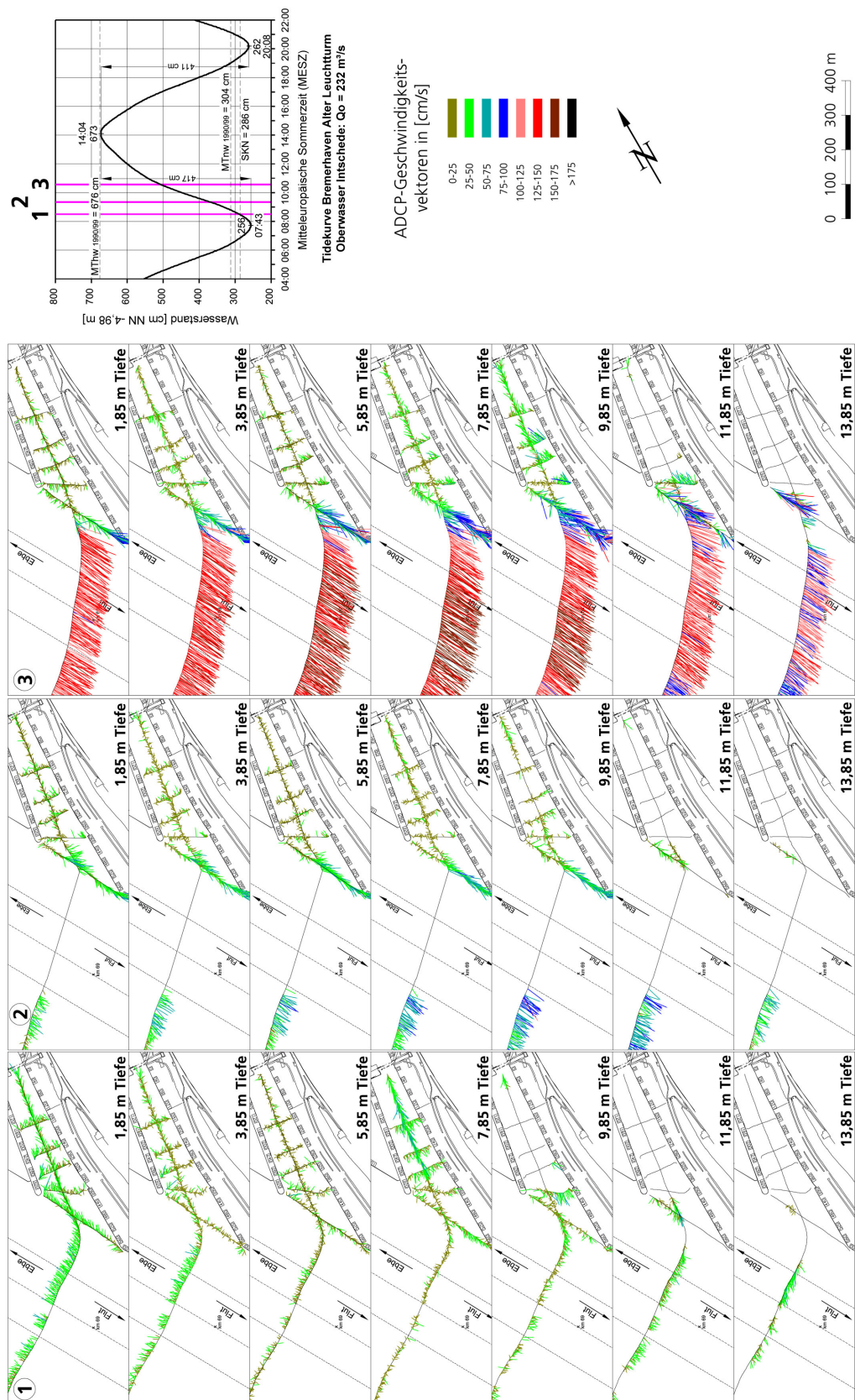


Abb. 26: Flutstrommessungen vor der Nordschleuse in Bremerhaven am 22.05.2001

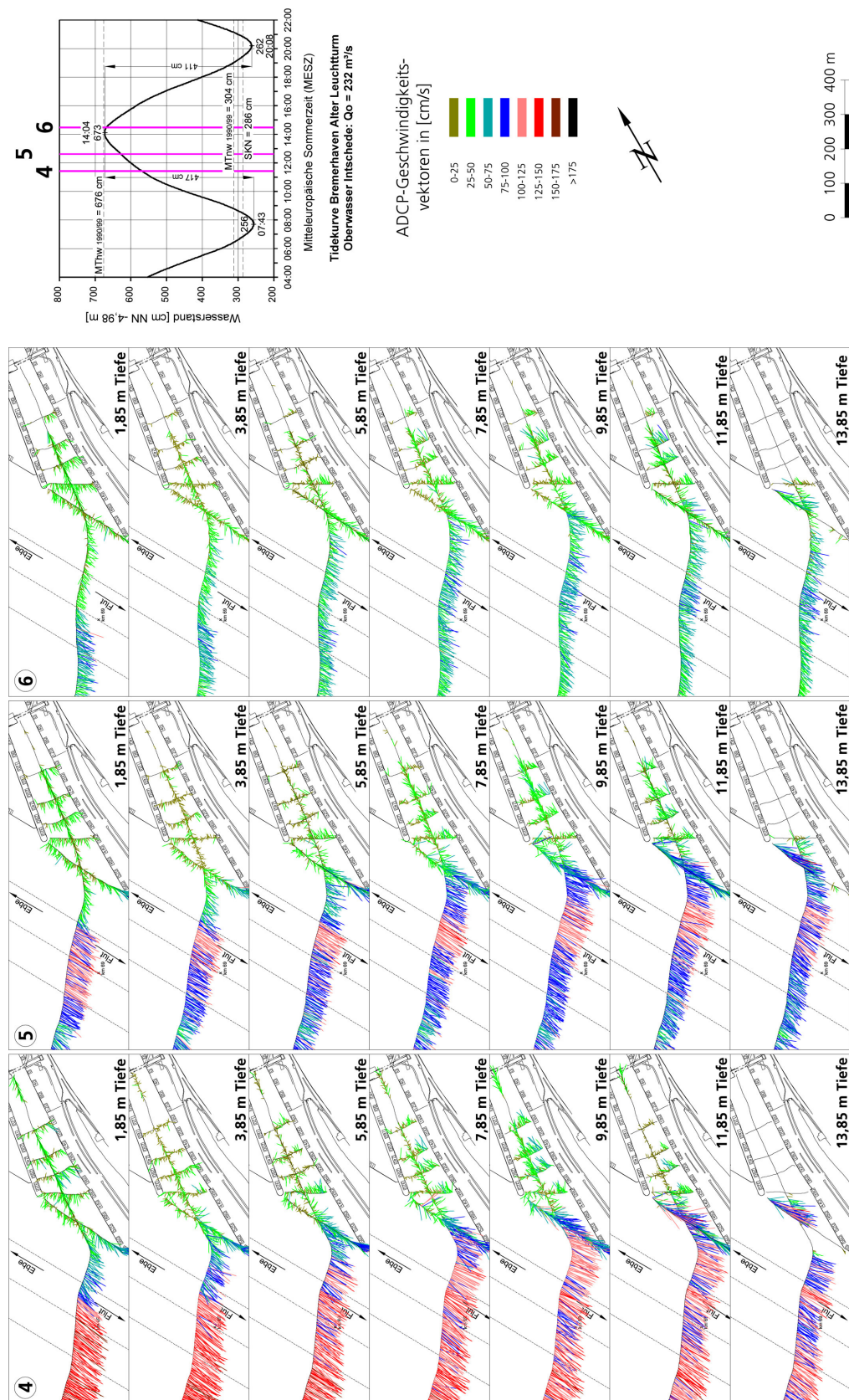


Abb. 27: Flutstrommessungen vor der Nordschleuse in Bremerhaven am 22.05.2001

Feststoffteilchen, die sich durch sehr geringe Sinkgeschwindigkeiten auszeichnen. Folglich muss damit ein entsprechend hoher Sedimenteintrag in den Vorhafen verbunden sein.

Mit sich abschwächender Strömungsenergie in der Weser werden weniger starke Walzenströmungen angefacht bei weiterhin deutlich ausgeprägten Dichteströmungen (Abb. 27, Messung 5). In der späten Flutstromphase bis nach Eintritt des Tidehochwassers dominieren im Vorhafen die Dichteströmungen. Mit steigendem Wasserstand kommt es dabei zur Beruhigung in den mittleren Wasserschichten. Bemerkenswert sind die bis zum Eintritt des Thw anhaltenden, relativ starken Einstömungen im sohlennahen östlichen Bereich (Abb. 27, Messung 6). An der Oberfläche wirken sich die aus dem Vorhafen gerichteten Strömungen bis zum rechten Fahrwasserrand aus (Abb. 27, 1,85 m).

• Ebbeströmungen

Die in Abb. 28 und 29 aufgetragenen Strömungen wurden bei einem Nipptidefall von 285 cm aufgenommen. Für die Strömungsverhältnisse im Vorhafen ist es von Bedeutung, dass ähnliche Oberwasserverhältnisse ($Q_0 = 228 \text{ m}^3/\text{s}$) wie bei den vorstehend erläuterten Flutstrombildern vorlagen.

Mit Abb. 28 werden die hydrodynamischen Vorgänge während der Kenterphase bei Flut dokumentiert. Es ist deutlich auszumachen, wie sich die Ebbeströmungen von den oberen zu den unteren Wasserschichten durchsetzen. Erst mit stärker abfließenden Ebbewassermengen in der Weser lösen sich die flutstromorientierten Dichteströmungen im Schleusenvorhafen auf (Abb. 28, Messung 2). Insgesamt gesehen sind dort in der zweiten Stunde nach Thw nur geringe und ungleichmäßig ausgerichtete Strömungen vorhanden.

Bei vollem Ebbestrom prägen sich im Vorhafen die zugehörigen Walzen- und Dichteströmungen aus (Abb. 28, Messung 3). Die bei Ebbe rechtsdrehenden Strömungswalzen werden im Gegensatz zur Flut vornehmlich in den oberen Wasserschichten angefacht. Das ist deshalb so, weil während der Ebbestromphase die Oberwassermenge dichtebedingt in den höheren Wasserschichten abgeführt wird. Die Verstärkung der Oberflächenströmungen führt dort zu dem höheren Energieeintrag über die Walzenströmungen in den Vorhafen. Die Walzenintensität nimmt mit der Wassertiefe ab. Im sohlennahen Bereich überwiegt die nach außen gerichtete Strömung (Abb. 28, 9,85 m).

Etwa ab $T_{\frac{1}{2}w}$ dominieren mit fortschreitender Ebbestromdauer die Dichteströmungen (Abb. 28 und 29, Messung 3 bis 5). Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie in der zweiten Flutstromphase mit umgekehrten Strömungsrichtungen. Im oberen und unteren Bereich finden vornehmlich die Ein- und Ausströmungen der Wassermassen statt. In den oberen Tiefenzellen strömt das Wasser mehr in den westlichen und in Sohlennähe aus dem östlichen Vorhafen. Innerhalb der Dichtestromwalze, in der mittleren Wasserschicht, stellt sich eine mehr wasserberuhigte Zone ein.

Mit fortschreitender Ebbedauer verstärken sich die Dichteströmungen. Bei abnehmender Wassertiefe verringert sich der im Vorhafen zur Verfügung stehende Querschnitt. Die Ein- und Ausströmungen konzentrieren sich mehr auf die oberen und unteren Wasserschichten.

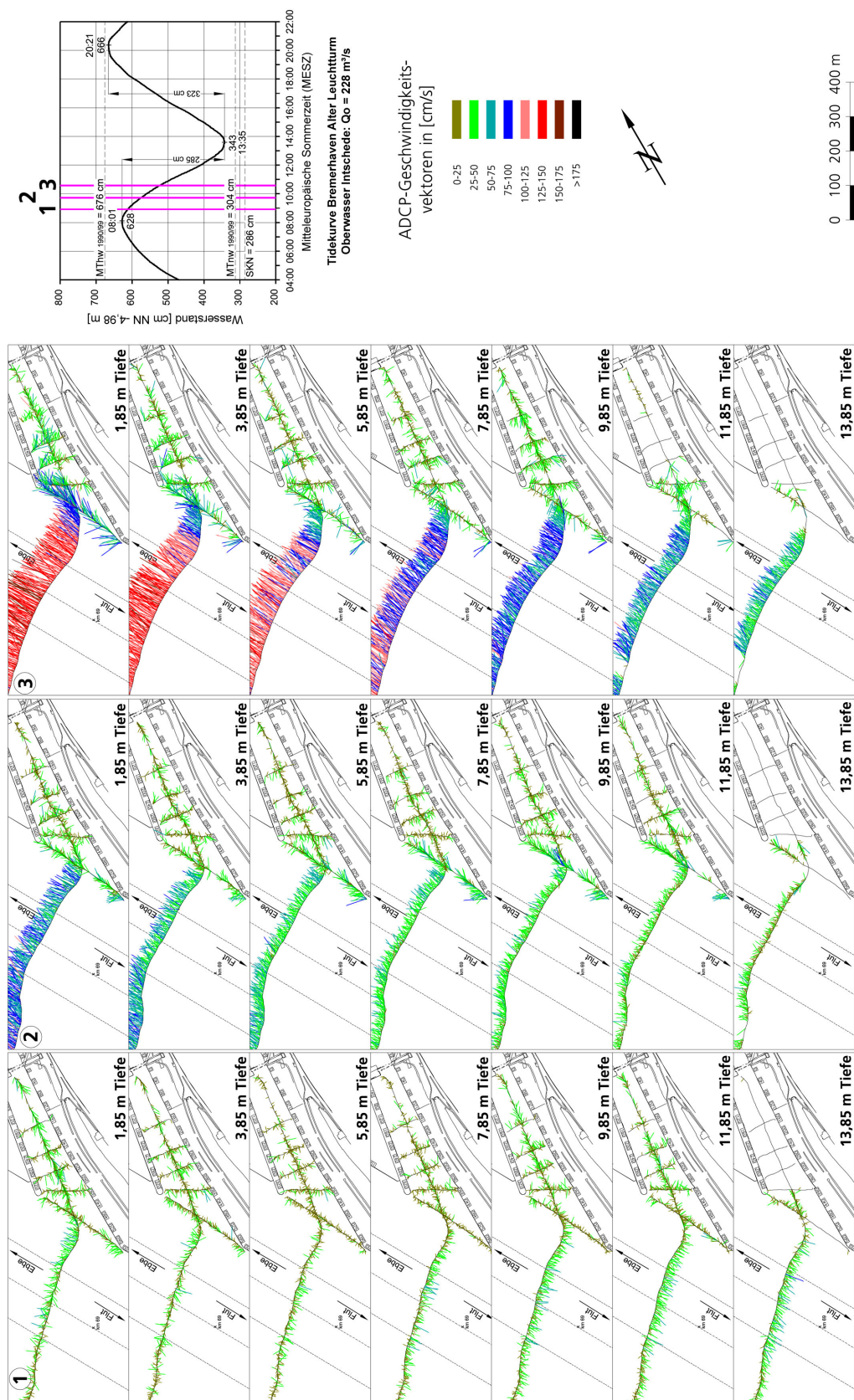


Abb. 28: Ebbestrommessungen vor der Nordschleuse in Bremerhaven am 16.05.2001

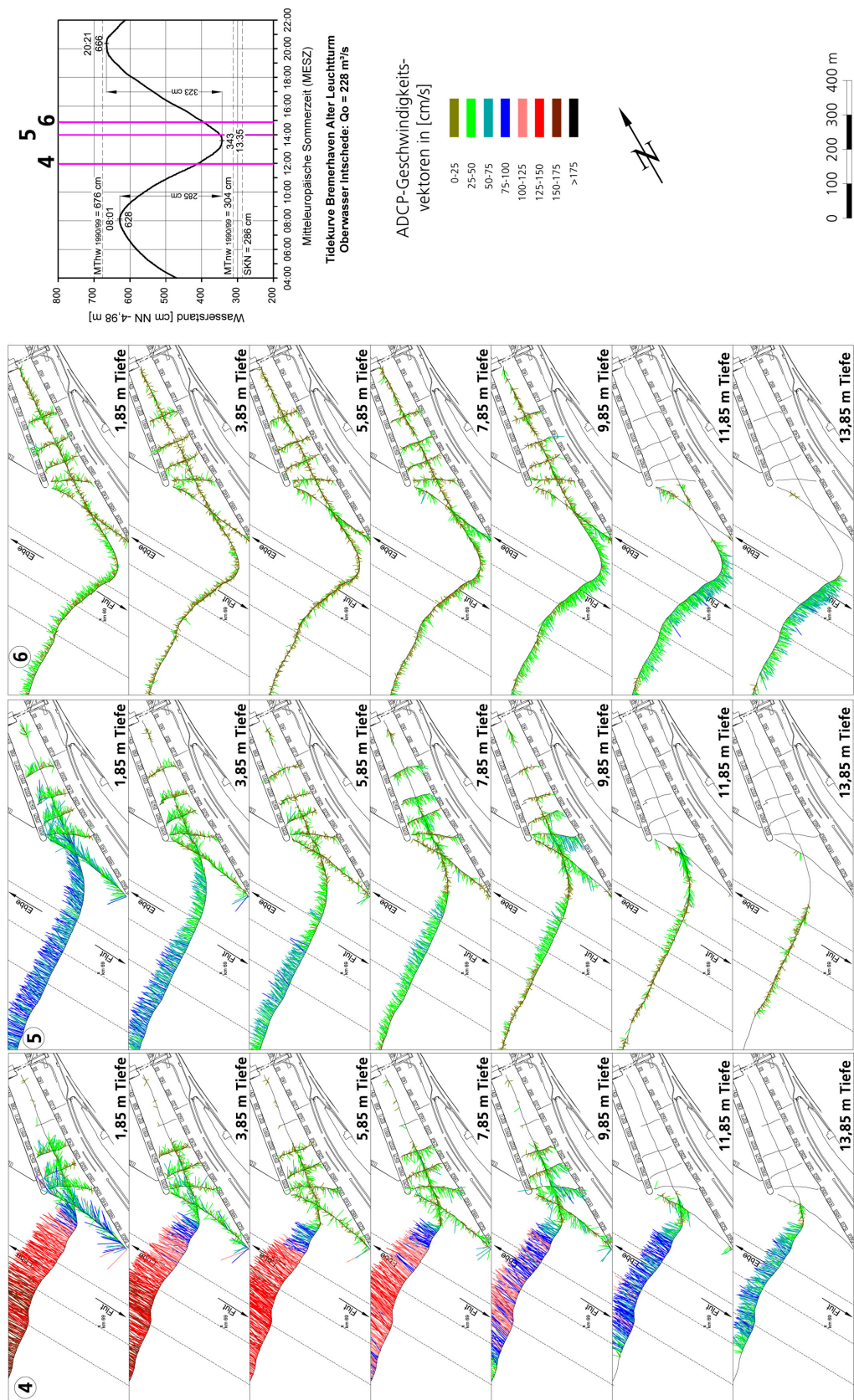


Abb. 29: Ebbestrommessungen vor der Nordschleuse in Bremerhaven am 16.05.2001

Im weiteren Tideverlauf stabilisieren sich die Dichteströmungen und erreichen noch nach dem Eintritt des Tideniedrigwasser absolute Geschwindigkeiten von $v > 50 \text{ cm/s}$ (Abb. 29, Messung 5). Dabei wirkt sich die sohlennahe Ausströmung bis in die Weser aus.

Bemerkenswert ist die langandauernde Ebbestromkenterphase in der Weser. Sie beginnt rd. 0,5 Std. nach Tnw in den tieferen Wasserschichten, weil sich dort das spezifisch schwerere Wasser aus der Nordsee zuerst durchsetzt (Abb. 29, Messung 5). An der Oberfläche fließt das Wasser noch mit Geschwindigkeiten bis zu rd. $v_e \approx 100 \text{ cm/s}$ stromab. Dort findet die Strömungsumkehr erst etwa eine Stunde später statt, wenn die stromauf gerichteten Flutstromgeschwindigkeiten im tiefen Wasser bereits bis $v_f \approx 100 \text{ cm/s}$ betragen (Abb. 29, Messung 6). In dieser Tidephase findet die Strömungsumkehr im Vorhafen der Nordschleuse statt (vgl. auch Abb. 26). In der dritten Stunde nach Tnw bilden sich wieder die flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen aus.

4.1.5 Salzgehalte

- **Flutstromverhältnisse**

Bremerhaven liegt bei mittleren Oberwasserverhältnissen im mesohalinen Brackwasserbereich des Weserästuars. Die tideabhängigen periodischen Schwankungen des Salzgehalts betragen dann $\Delta S = S_{Kf} - S_{Ke} > 10 \text{ ‰}$.

Bei einem Tidehub von 430 cm und $Q_o = 212 \text{ m}^3/\text{s}$ herrschten am 23.05.2001 ähnliche Randbedingungen wie während der Strömungsmessungen vom Vortag (Abb. 26 und 27).

Es ist grundsätzlich so, dass die Salzkonzentrationen in den Vorhäfen zu denen in den Tideströmen phasenverschoben sind. Zum Zeitpunkt des Tnw ist im Weserwasser weniger Salz anzutreffen als vor der Nordschleuse (Abb. 30, Messungen 1).

Nach der zweiten Messung wurde am 23. Mai eine Niedrigwasserschleusung zum Überseehafen durchgeführt. Zum Wasserspiegelausgleich wurde vorher salzhaltigeres Wasser aus der Schleusenkammer in den Vorhafen abgegeben. Die höheren Salzkonzentrationen sind bei der ersten Messung in Abb. 30 ab 8 m Wassertiefe auszumachen. Bei der zweiten Messung sind die höheren Salzgehalte im gesamten Vorhafen zwischen 5 m (Pos. 1) und 9 m Wassertiefe (Pos. 5) zu erkennen. Es wurde bereits vorstehend erwähnt, dass die Schleusungsverluste durch Zuwässerungen in den Überseehafen während der Tidehochwasserphase ausgeglichen werden. Das in den Vorhafen abgegebene salzigere Wasser verstärkt bei Niedrigwasser die nach außen gerichteten Dichteströmungen.

In der zweiten Stunde nach Tideniedrigwasser kehren sich die Salzkonzentrationen zwischen Strom und Vorhafen um. In der Weser führt die rasche Zunahme der Salzgehalte im Sohlenbereich zu dem Horizontalgefälle von Pos. 6 zu Pos. 1 (Messung 3 in Abb. 30). Ab Tidehalbwasser, wenn sich die flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen ausbilden, stabilisieren sich die Salzgehaltsverteilungen. (Messungen 4 und 5). Mit den Vertikal- und Horizontalverteilungen der Profile lassen sich die daraus resultierenden Strömungsverhältnisse nachvollziehen (vgl. Abb. 26 Messung 3 und Abb. 27).

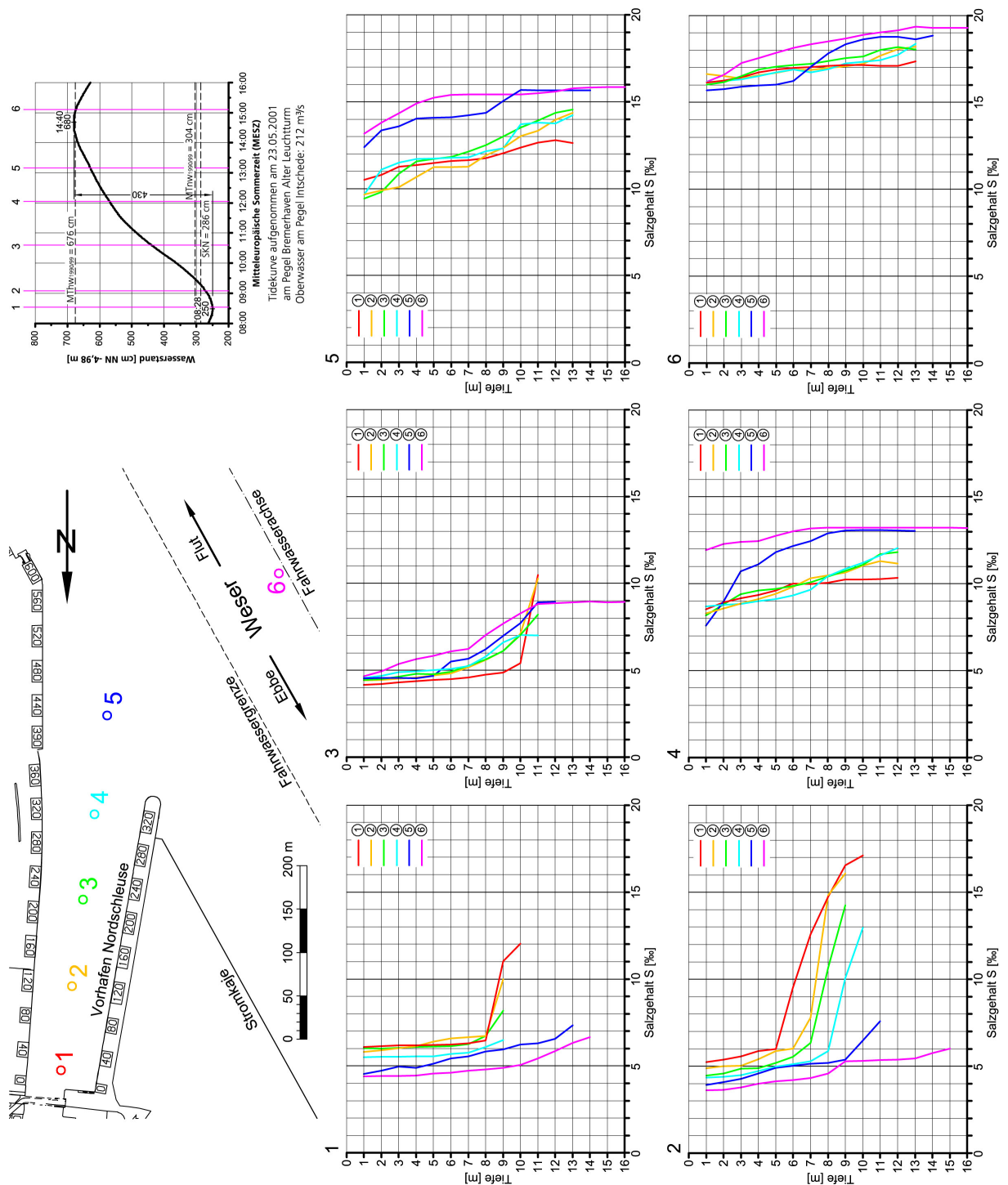


Abb. 30: Salzgehalte im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, Flut am 23.05.2001

Mit fortschreitender Flutstromphase erhöht sich der Salzgehalt bis zur Strömungskenterung. Kennzeichnend ist das Vertikalprofil der Position 5 mit den deutlich auszumachenden Unterschieden der Salzgehalte in den oberen und unteren Wasserschichten (Messungen 4 bis 6).

- **Ebbestromverhältnisse**

Am 17. Mai 2001 betrug der Nipptidefall 286 cm. Bei einem Oberwasser von $Q_o = 250 \text{ m}^3/\text{s}$. Die in Abb. 31 dargestellten Salzgehalte wurden damit bei etwa gleichen hydrologischen Randbedingungen ermittelt wie die Tideströmungen am Vortag (Abb. 28 und 29).

Die in der späten Flutstromphase gemessenen Salzgehaltsverteilungen in Abb. 31 (Messung 1 und 2) sind mit den bei Springtiden ermittelten Verteilungen (Abb. 30, Messungen 5 und 6) vergleichbar.

Auch während der Ebbephase kehren sich die Salzverteilungen zwischen Weser und Vorhafen ebenfalls nach der Strömungskenterung in der zweiten Stunde nach Thw um (Messung 3 in Abb. 31). Anschließend bauen sich die dichtebedingten, ebbestromorientierten Strömungen auf, stabilisieren sich und dauern bis nach Tnw an (Messungen 4 bis 6 in Abb. 31 sowie Abb. 28 und 29). Erwähnenswert ist der starke Vertikalgradient mit Salzgehaltsdifferenzen von bis zu $\Delta S > 5 \text{ ‰}$. Damit wird belegt, weshalb in der Ebbestromphase die zur See transportierten Wassermengen in den oberen Wasserschichten mit dem Strömungseffekt in den Vorhafen transportiert werden. Der Wasseraustausch findet durch die Rückströmung in den unteren Wasserschichten aus dem Vorhafen statt.

4.1.6 Schwebstoffe

- **Flutstromverhältnisse**

Die über die Lichtdurchlässigkeit ermittelten Schwebstoffkonzentrationen wurden bei der Springtide vom 23.05.2001 gleichzeitig mit den Salzgehaltsverteilungen gemessen. Aus Platzgründen sind in dieser Arbeit sechs von den insgesamt 13 Messungen ausgewählt worden Abb. 32.

Nach Tnw gingen die Schwebstoffgehalte an allen 6 Messstellen bis auf $C_s \approx 100 \text{ mg/l}$ zurück (Messungen 1 und 2 in Abb. 32). Lebhafter werden die morphodynamischen Vorgänge bei Tidehalbwasser (Messung 3). Durch die Strömungs- und Dichteeffekte werden die Feststoffkonzentrationen besonders in den unteren Wasserschichten und im äußeren Vorhafen deutlich erhöht. Dem durch die Walzen- und Dichteströmungen resuspendierten Material im Vorhafen überlagern sich neue Einträge aus der Weser. Die Streuungen der Messergebnisse sind auf die turbulenten Strömungen und Austauschvorgänge zurückzuführen.

Die sich mit fortschreitender Flutstromdauer verstärkenden Sohlströmungen in den Vorhafen erhöhen die Schwebstoffkonzentrationen (Messungen 4 bis 6 in Abb. 32). Die höchsten Werte wurden in der Weser und im Vorhafen während der Tidehochwasserphase ermittelt. Konzentrationen von $C_s > 500 \text{ mg/l}$ an der Oberfläche und $C_s > 2000 \text{ mg/l}$ in den tieferen Wasserschichten (Messungen 5 und 6) sind mit den starken, in den Vorhafen gerichteten Walzen- und Dichteströmungen in diesem Tideabschnitt erklärt (vgl. Abb. 27).

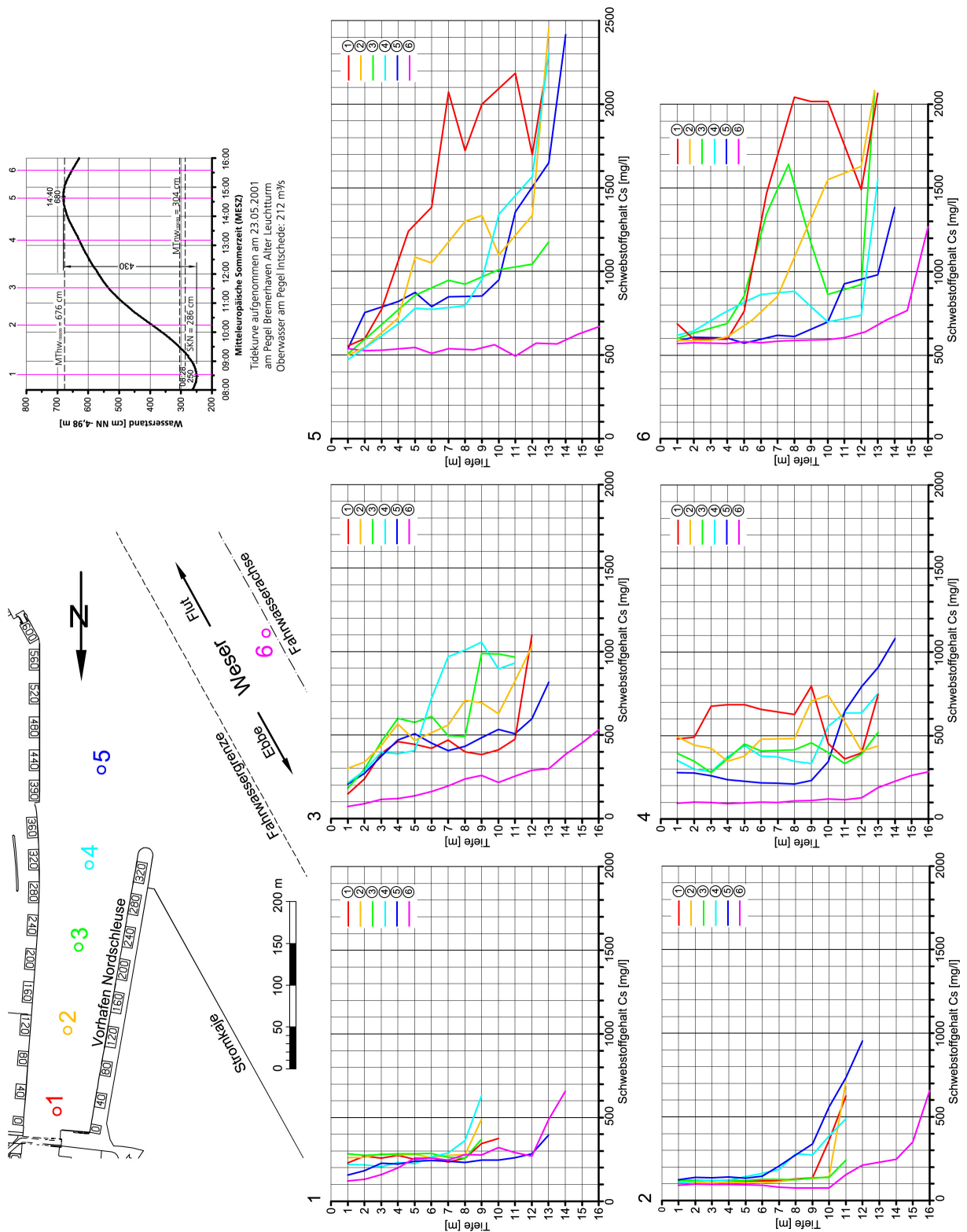


Abb. 32: Schwebstoffe im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, Flut am 23.05.2001

Die bis in die höheren Wasserschichten anzutreffenden hohen Feststoffkonzentrationen im inneren Vorhafen (Position 1 bis 3) sind mit den Strömungsbedingungen und Sedimenteigenschaften zu begründen. Die biologischen Vorgänge an den aus limnischen und marinen Sedimenten mit hohen organischen Anteilen zusammengesetzten Schwebstoffe erhöhen die Schwebefähigkeit der Partikel. Von den feinen mineralischen Feststoffkörpern werden leichte organische Substanzen in großen Flocken aufgenommen, was die Sinkgeschwindigkeit wesentlich verringert (GREISER et. al., 1992). Dadurch wird die Sedimentation verlangsamt bzw. verhindert. Aussagen über das Sinkverhalten sind deshalb mit Unsicherheiten behaftet.

Die in den Vorhäfen eingetragenen Feststoffe sind eine Vorstufe von Flüssigschlick (Fluid Mud). Der langandauernde Konsolidierungs- und Sedimentationsprozess wird vor allem durch die biologischen Komponenten beeinflusst. Der Abbau organischer Substanzen mangels Sauerstoffzufuhr schafft anaerobe Zustände, die zur Verfestigung der Feststoffpartikel führen.

Die in Abb. 32 aufgetragenen Vertikalprofile mit hohen Schwebstoffkonzentrationen in den unteren Wasserschichten veranschaulichen den überwiegend in den Vorhafen gerichteten Sedimenttransport. Ursächlich ist dafür der sich ab $T_{\frac{1}{2}w}$ überlagernde Strömungs- und Dichteeffekt und die daraus resultierende, mit zunehmender Flutstromdauer stärker ausgeprägte bis nach Thw anhaltende sohlennahe Einströmung.

Somit kommt es während der Flutstromphase zu einer positiven Feststoffbilanz im Vorhafen. Die Transportkapazitäten während der Ebbestromphase sind zu gering, um die während der Flut in den Vorhafen eingetragenen Feststoffe wieder auszuräumen. Es ist vielmehr so, dass dann durch die entgegengesetzt gerichteten Dichteströmungen Feststoffpartikel mehr limnischen (Süßwasser) Ursprungs oberflächlich in den Vorhafen eingetragen werden. Die Durchmischung mit den marinen (Salzwasser) Sedimenten ist auch ursächlich für die Entstehung des Phänomens Fluid Mud.

• Ebbestromverhältnisse

Bei dem Tidefall von lediglich 286 cm wurden während der gesamten Ebbestromdauer am 17. Mai 2001 nur sehr geringe Schwebstoffkonzentrationen in der Weser und dem Vorhafen zur Nordschleuse gemessen Abb. 33. Ein Vergleich der ersten Profile (Messungen 1 und 2) mit den letzten (5 und 6) in Abb. 33 zeigt jedoch, dass in der späten Flutstromphase im Vorhafen mehr Schwebstoffe transportiert werden als bei ausklingender Ebbestromphase. Bezeichnend sind die besonders geringen Konzentrationen nach der Flutstromkenterung von $C_s \leq 50 \text{ mg/l}$ (Messung 3).

Die Dichteströmungen sind offenbar nicht dynamisch genug um den Wasserkörper im Vorhafen wesentlich mit Schwebstoffen anzureichern. Das Vergleichsprofil aus der Weser (Pos. 6) zeigt, dass von dort aus über die Walzen- und Dichteströmungen keine nennenswerten Feststoffmengen oberflächlich in den Vorhafen eingetragen wurden. Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass die Schwebstoffkonzentrationen im Vorhafen der Nordschleuse maßgeblich von der erheblich schwankenden Feststofffracht im Tidestrom abhängen. Zur Springtidezeit erreichen die Konzentrationen in der Weser bedeutend höhere Werte als bei Nipptiden. Für vergleichbare Oberwasserbedingungen im Mai 2001 wurden bei der Springtide Schwebstoffkonzentrationen bis zu

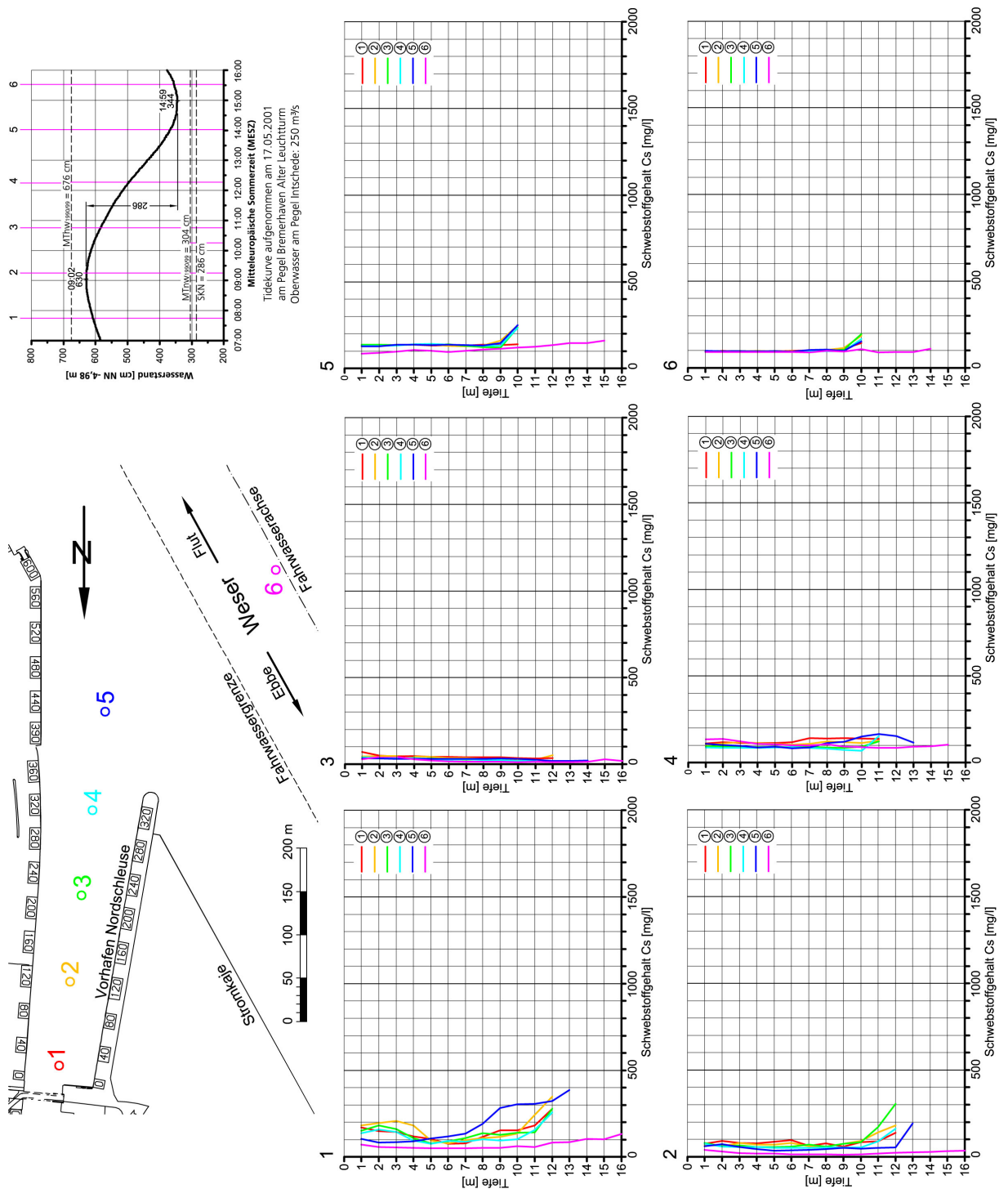


Abb. 33: Schwebstoffe im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, Ebbe am 17.05.2001

Cs > 500 mg/l (Abb. 32) und bei Nipptide Cs \approx 100 mg/l (Abb. 33) festgestellt.

4.2 Bremerhaven Kaiserschleuse

4.2.1 Strömungen in der Weser

• Flutströmungen

Am 4. Oktober 2005 betrug der Tidehub in Bremerhaven 400 cm bei einem Oberwasserabfluss am Pegel Intschede von $Q_o=162 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 34). Die ersten Profile wurden, ausgehend vom Querschnitt am Freilaufkanal (Profil 1), zum Eintritt des Thw gefahren. Die Ebbestromkenterung dauerte wie bei den Strömungsmessungen vor der Nordschleuse (vgl. Abb. 10) etwa eine Stunde, bis sie sich von den unteren bis zu den oberen Wasserschichten durchgesetzt hatte (Abb. 34).

Vor der Columbuskaje setzte sich die Flut zuerst im westlichen (linken) Fahrwasser der Weser und außerhalb davon durch (Messungen 2 und 3 in Abb. 34). In Sohlennähe wurden bei der 4. Messung (Abb. 35) bereits Flutstromgeschwindigkeiten von $v_f > 125 \text{ cm/s}$ festgestellt.

Auch vor der Kaiserschleuse wurden zum Ende des steilen Flutastes der Tidekurve bei Tidehalbwasser ($T_{\frac{1}{2}w}$) die stärksten Flutstromgeschwindigkeiten gemessen (Abb. 35, Messungen 5 und 6). Bei voll ausgeprägtem Flutstrom wurden im Fahrwasser Geschwindigkeiten bis zu $v_f > 175 \text{ cm/s}$ im linken, westlichen Fahrwasser und außerhalb davon gemessen. In den Profilen oberhalb der Kaiserschleuse findet verstärkt in den mittleren und oberen Tiefenzellen eine Strömungsverlagerung zum Osten statt.

Die über den Fahrwasserbereich gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten von der ausklingenden Ebbestromphase bis zum voll entwickelten Flutstrom sind für die Profile 1 (Freilaufkanal) bis 5 (Mitte Columbuskaje) in Abb. 36 als Vertikalprofile aufgetragen. Insgesamt sind die Strömungsgeschwindigkeiten in der ersten Flutstromphase in Abb. 36 gleichmäßiger über die Tiefe verteilt als vor der Nordschleuse zur gleichen Tidephase (vgl. Abb. 12). Die Geschwindigkeitsgradienten bei der letzten Ebbestrommessung haben einen ähnlichen Verlauf wie bei der entsprechenden Messung vor der Nordschleuse (vgl. Abb. 12). Morphologisch von Bedeutung ist die starke Transportkapazität der Strömungen in den unteren Wasserschichten bereits in der ersten Flutphase (Abb. 36). Morphologisch bedingt sind diese Brackwassereffekte im tiefen Wasser vor der Nordschleuse stärker ausgeprägt (vgl. Abb. 9 und 12). Auch in Abb. 36 verlagern sich die maximalen Geschwindigkeiten innerhalb der Wassersäule mit fortschreitender Flutstromdauer nach oben. Die insgesamt etwas schwächeren Strömungsgeschwindigkeiten können auf die veränderten morphologischen Randbedingungen zurückgeführt werden. Auch am 4. Oktober wurden während der Flut mittlere Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrwasser von $v_f > 150 \text{ cm/s}$ erreicht.

Die mit sich abflachendem Tideast schwächer werdenden Strömungen sind mit der 7. bis 9. Messung in Abb. 37 dokumentiert. Die morphologisch bedingte Strömungsumlenkung nach Osten mit der zurückgehenden Sedimentation vor der Columbuskaje ist auch noch in der späteren Flutstromphase mit den Messungen in Abb. 37 auszumachen. Mit dem Eintritt des Thw (10. Messung in Abb. 38) kündigte sich zunächst im flacheren Wasser die bevorstehende Flutstrom-

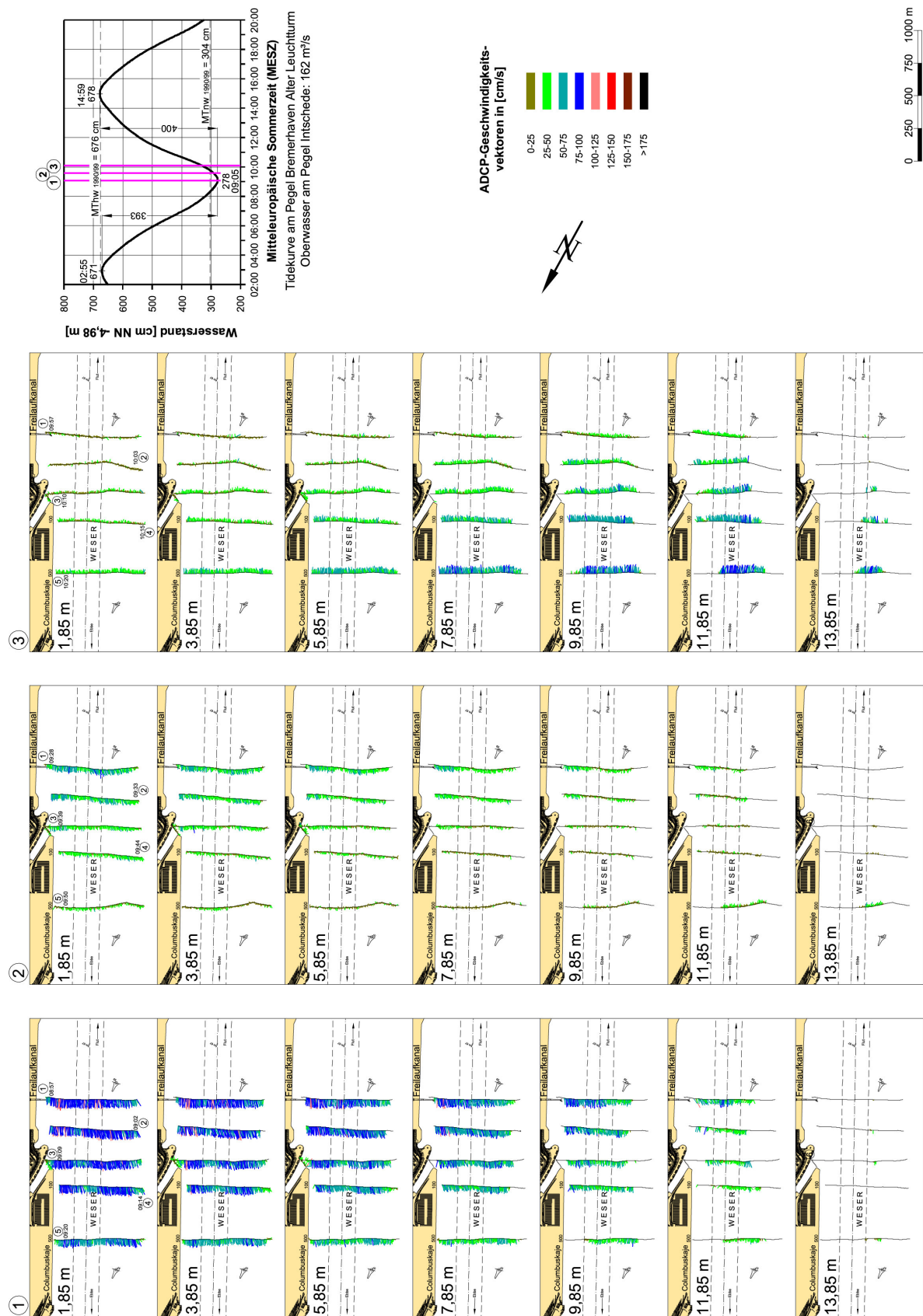


Abb. 34: Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 04.10.2005, 1. Flutphase

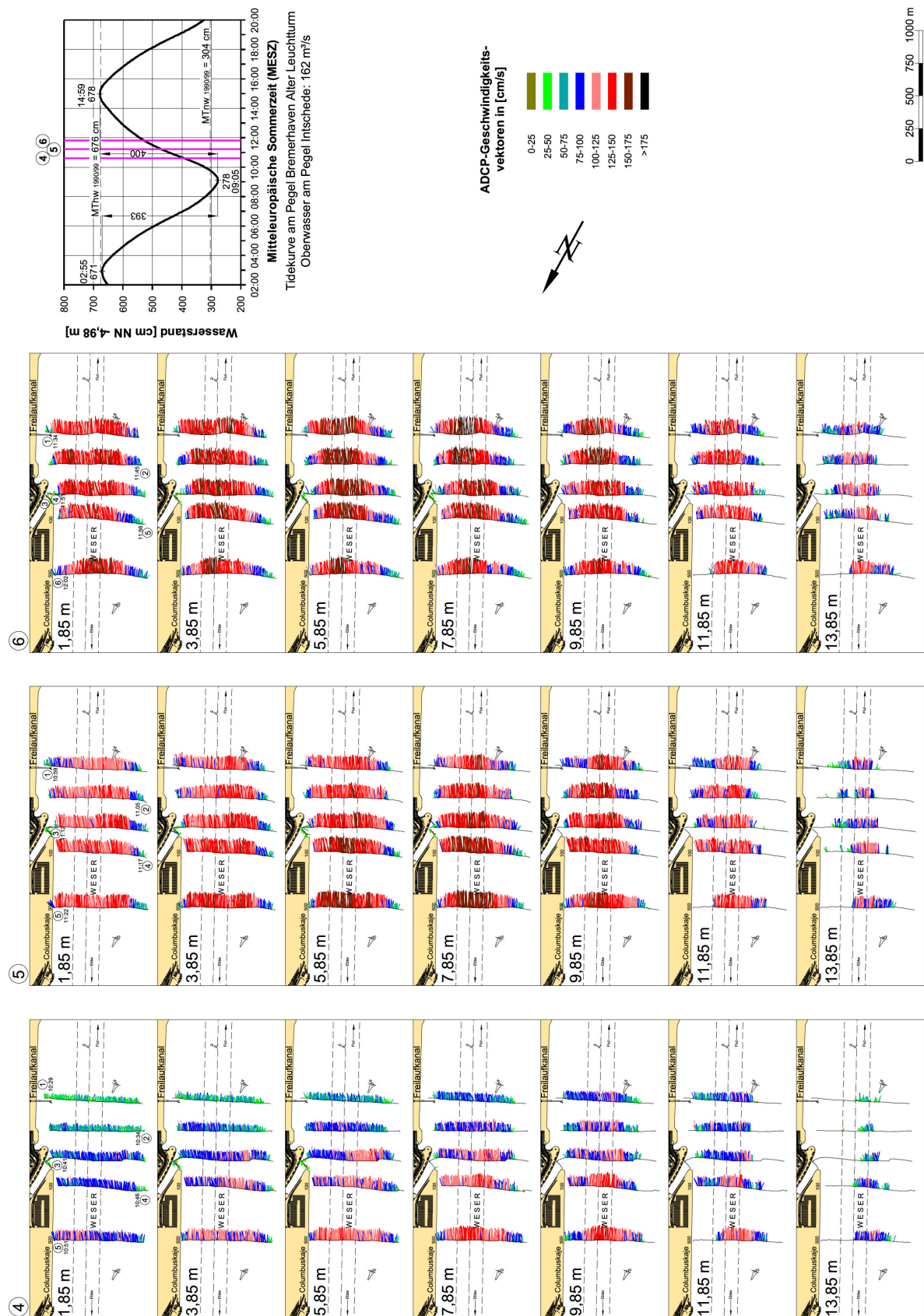


Abb. 35: Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 04.10.2005, 2. Flutphase

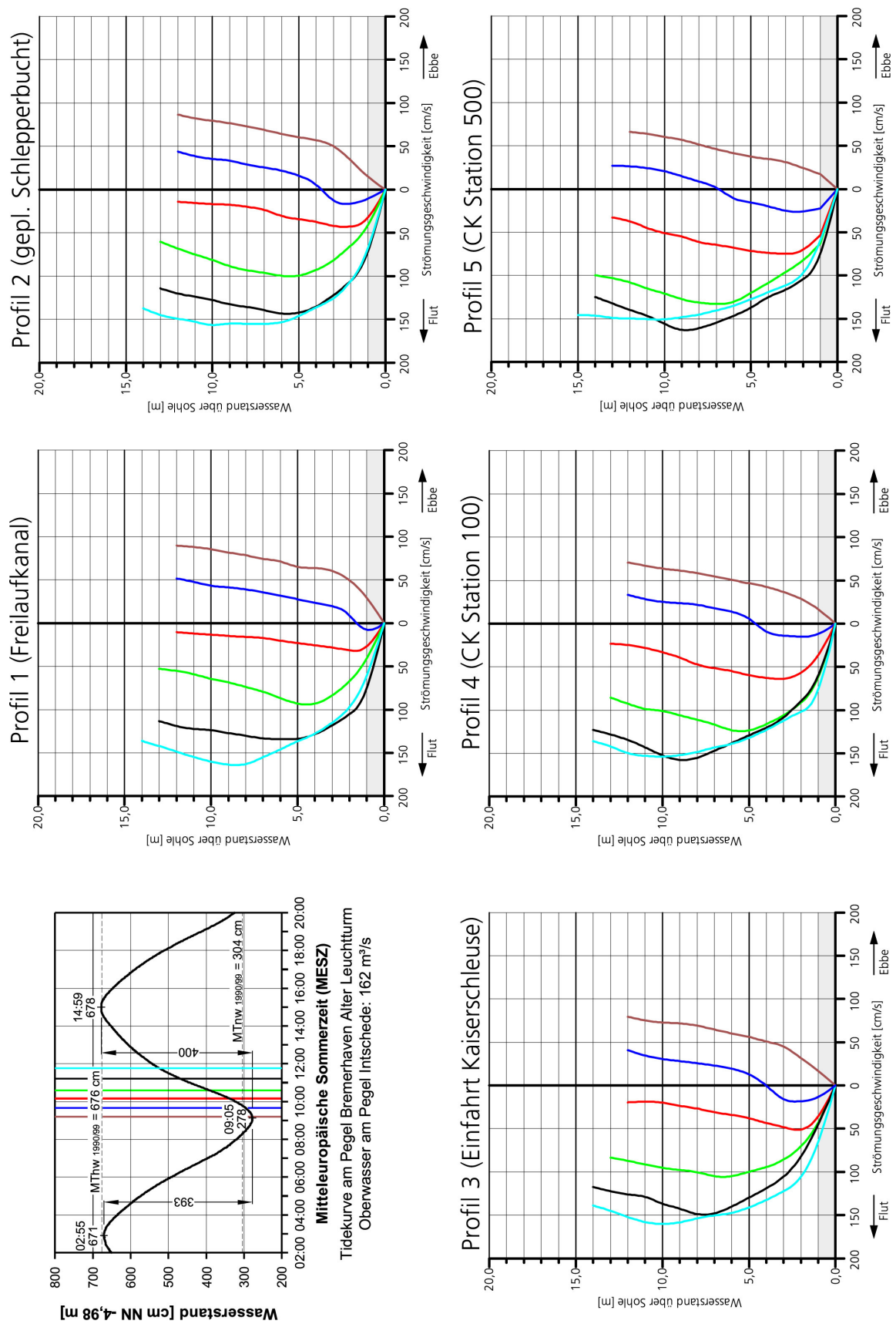


Abb. 36: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 04.10.2005

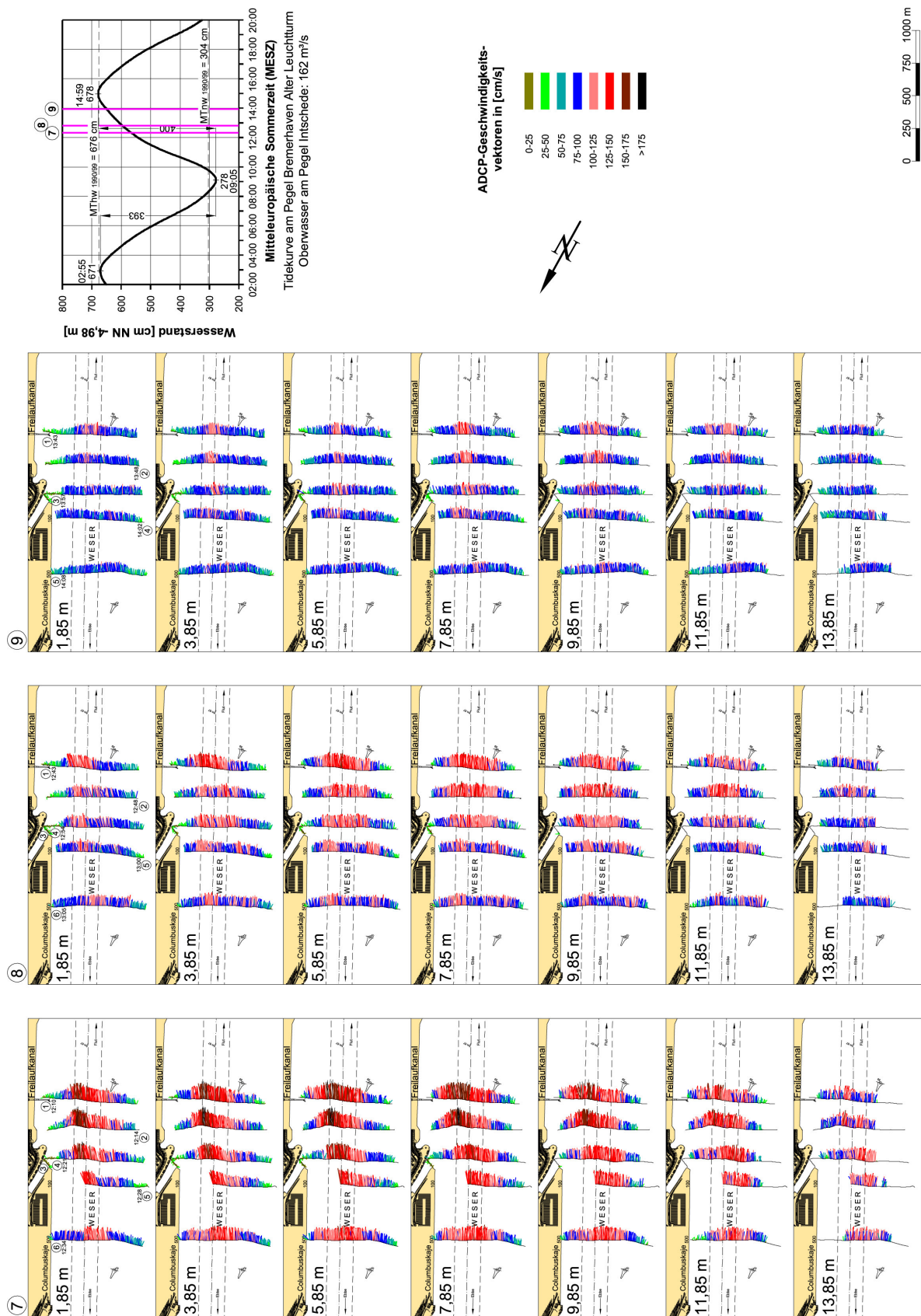


Abb. 37: Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 04.10.2005, 3. Flutphase

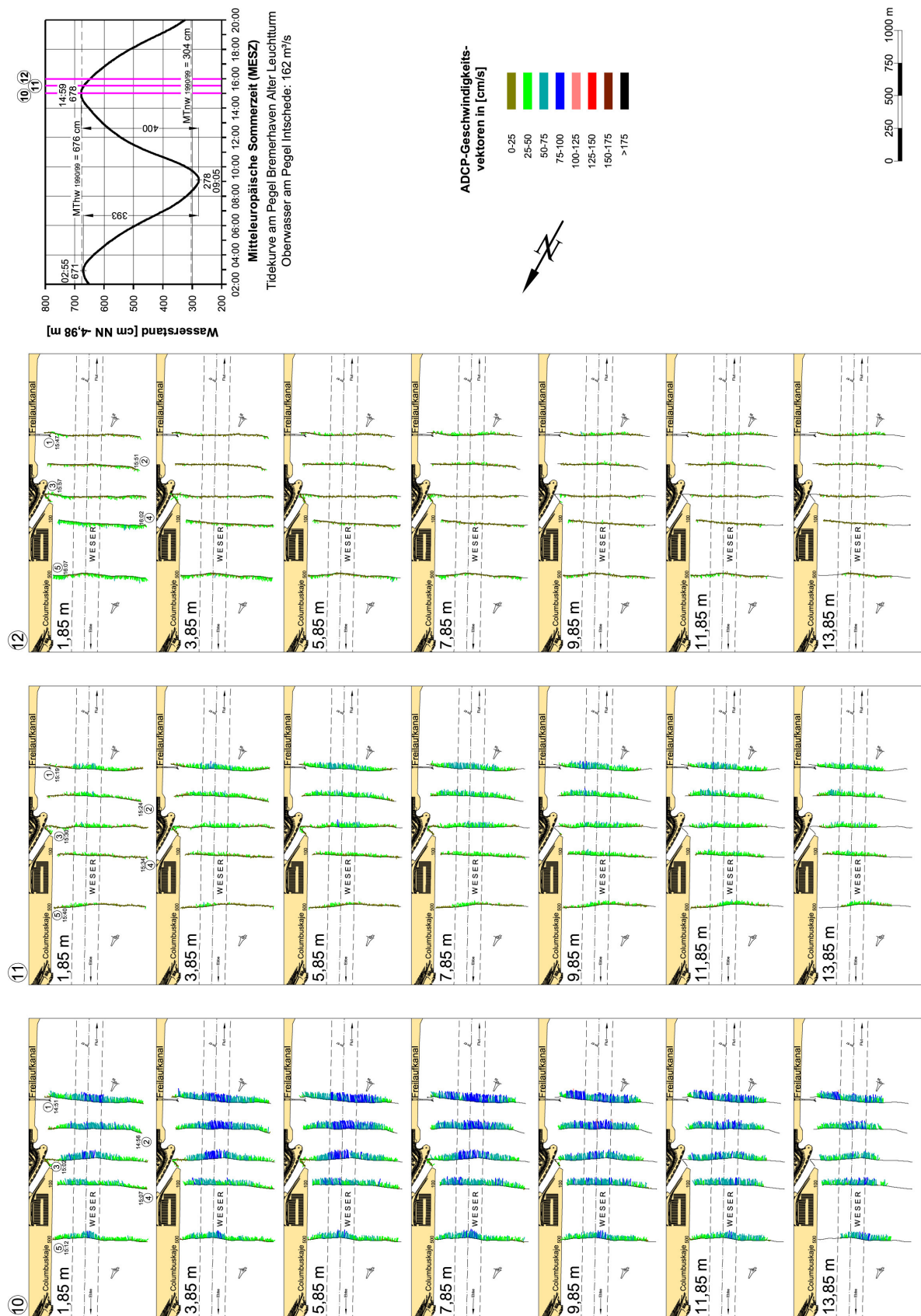


Abb. 38: Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 04.10.2005, letzte Flutphase

kenterung an. Etwa eine Stunde später setzte die Ebbeströmung ein (Messung 12, Abb. 38).

Die stetige Abnahme der Strömungsintensitäten in der späten Flutphase bis zur Kenterung wird auch mit den gleichmäßig über die Wassertiefe verteilten mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrwasser dokumentiert (Abb. 39). Kennzeichnend ist der bis zum Eintritt des Thw vorhandene bemerkenswerte Geschwindigkeitsgradient im Sohlenbereich.

• Ebbeströmungen

Bei einem Oberwasserabfluss am Pegel Intschede von $Q_o=123 \text{ m}^3/\text{s}$ betrug der Nipptidefall am 12. Oktober 2005 324 cm. Die Kenterung setzte zuerst kurz nach Tidehochwasser im flacheren Wasser außerhalb der Fahrrinne ein (Messung 1 in Abb. 40). Etwa eine Stunde nach Thw setzte sich der Ebbestrom ebenfalls zunächst in den oberen Wasserschichten und in den geringeren Wassertiefen außerhalb des Fahrwassers durch (Messung 3 in Abb. 40).

Während der ersten Ebbestromphase zeigt sich die kontinuierliche Verstärkung der Strömungsgeschwindigkeiten und die gleichmäßige Abnahme der Intensität mit der Wassertiefe (Abb. 41, Messung 4 bis 6). Die bei der 4. Messung im Profil 2 gemessenen Turbulenzen am linken Fahrwasserrand wurden bei der Durchfahrt eines Laderaumsaugbaggers verursacht.

Die über die Fahrrinnenbreite gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten in Abb. 42 dokumentieren die geringen Vertikalgradienten während der späten Flutstromphase mit der danach von oben nach unten fortschreitenden Strömungsumkehr. Anschließend verstärken sich die Ebbestromgeschwindigkeiten und erreichen ihre größten Werte in der 3. Stunde nach Tidehochwasser mit $v_{emax} \approx 150 \text{ cm/s}$ an der Oberfläche. Die Vertikalverteilungen in Abb. 42 veranschaulichen, wie die Oberwassermengen in der Ebbephase die Oberflächenströmungen verstärken und die Sohlströmungen schwächen (vgl. Abb. 19).

Die ADCP-Profile zeigen in Abb. 43 bei $T_{\frac{1}{2}w}$ (7. Messung) in den oberen Wasserschichten Strömungen bis $v_{emax} > 175 \text{ cm/s}$. Auffällig ist die morphologisch bedingte Strömungsumlenkung nach Westen mit den Größtwerten außerhalb des Fahrwassers (Abb. 43). Selbst bei Eintritt des Tideniedrigwassers wurden in der oberen Tiefenzelle noch Ebbeströmungen von bis zu $v_e > 100 \text{ cm/s}$ ermittelt Abb. 44. Gleichzeitig setzte in den unteren Schichten bereits die Ebbestromkenterung ein. Sie hatte sich erst etwa eine Stunde später bis nach oben durchgesetzt (Messungen 10 bis 12 in Abb. 44).

Die letzte Ebbestromphase mit der anschließenden Strömungsumkehr, bei der das salzhaltigere Wasser sich zuerst in den unteren Wasserschichten durchsetzt, wird mit Abb. 45 veranschaulicht. Die komplexen Abläufe der Ebbestromkenterung sind mit der Flutmessung vor der Kaiserschleuse und den vorstehend beschriebenen Strömungsvorgängen vor der Nordschleuse vergleichbar.

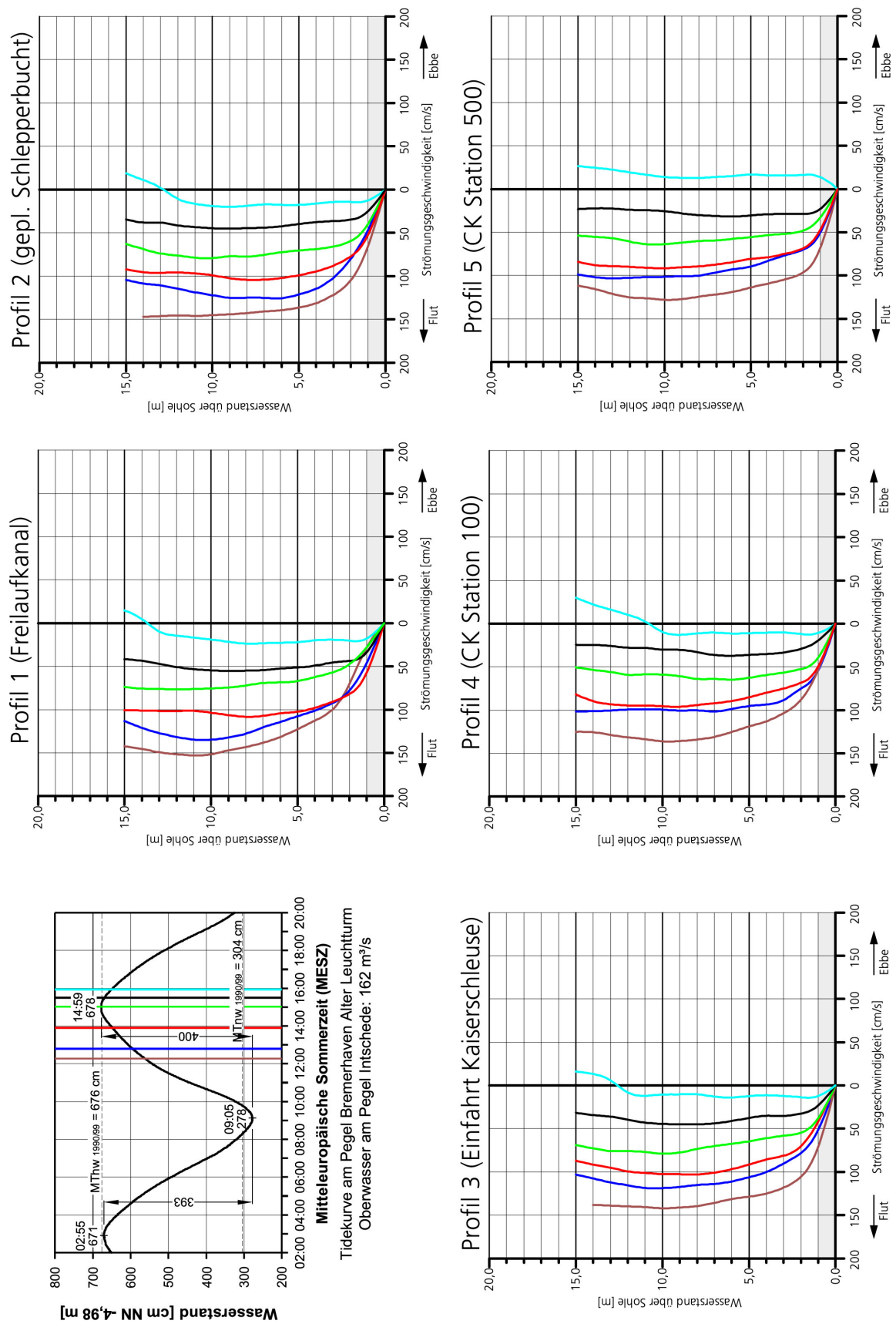


Abb. 39: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 04.10.2005

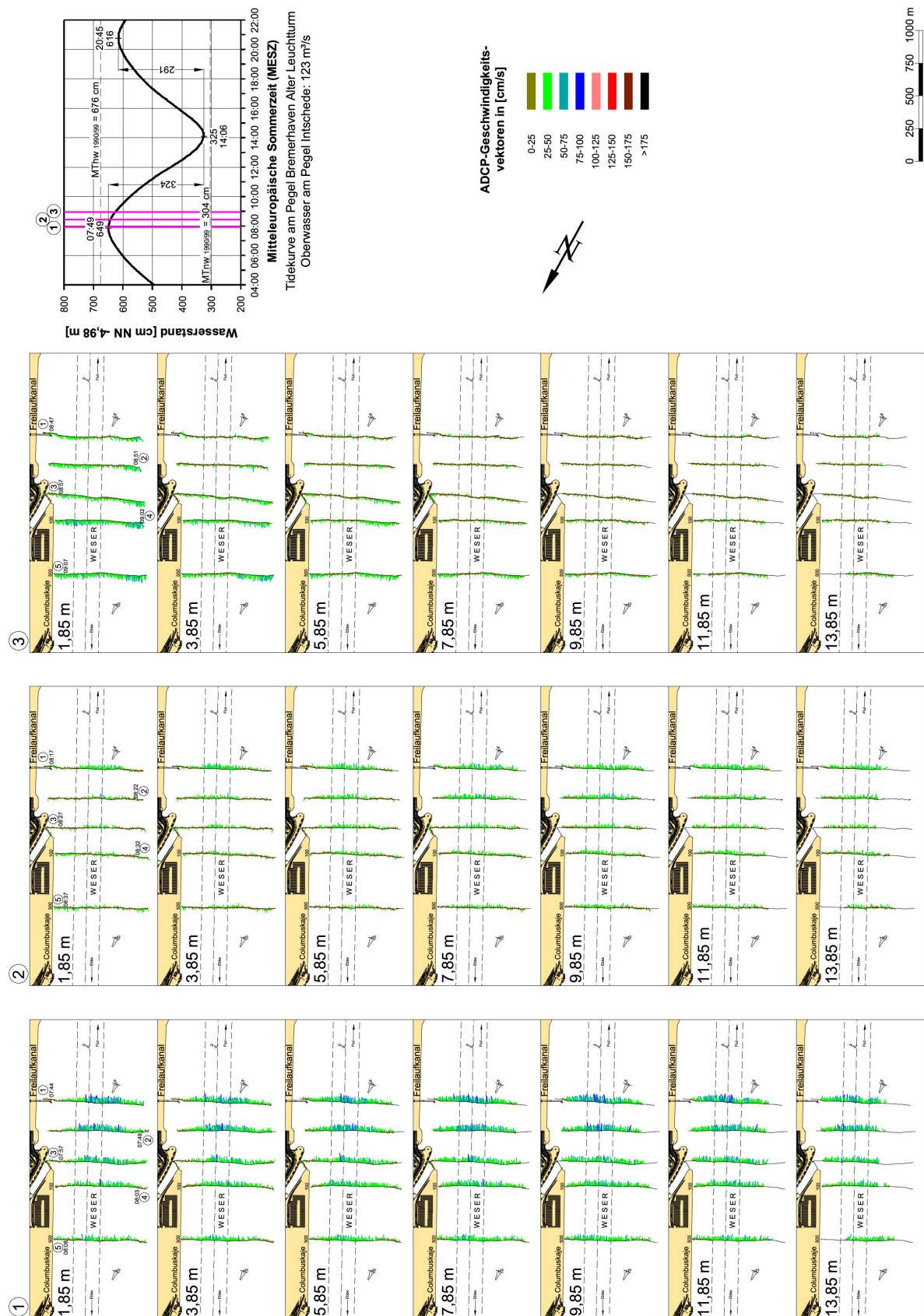


Abb. 40: Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 12.10.2005, 1. Ebbephase

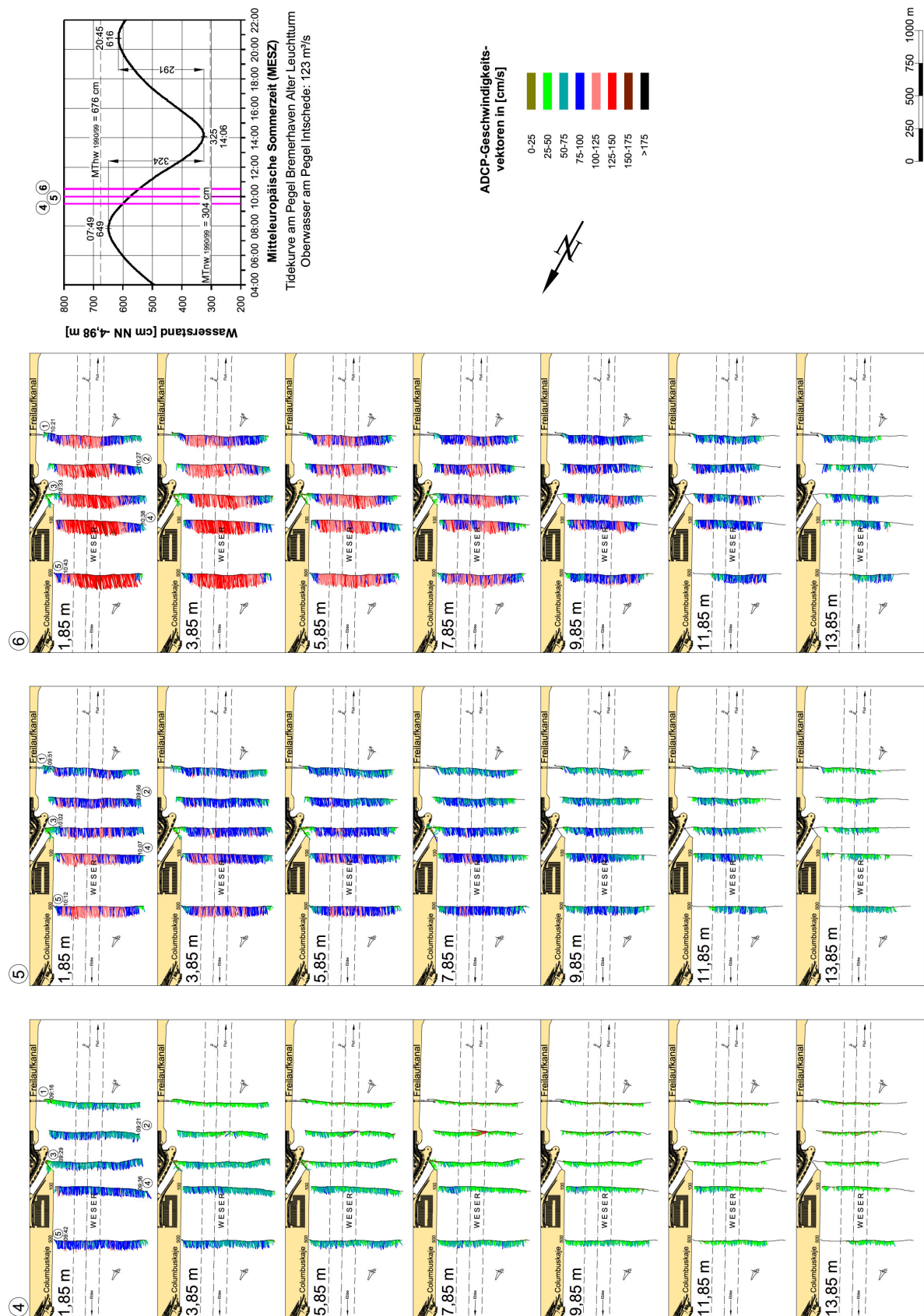


Abb. 41: Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 12.10.2005, 2. Ebbephase

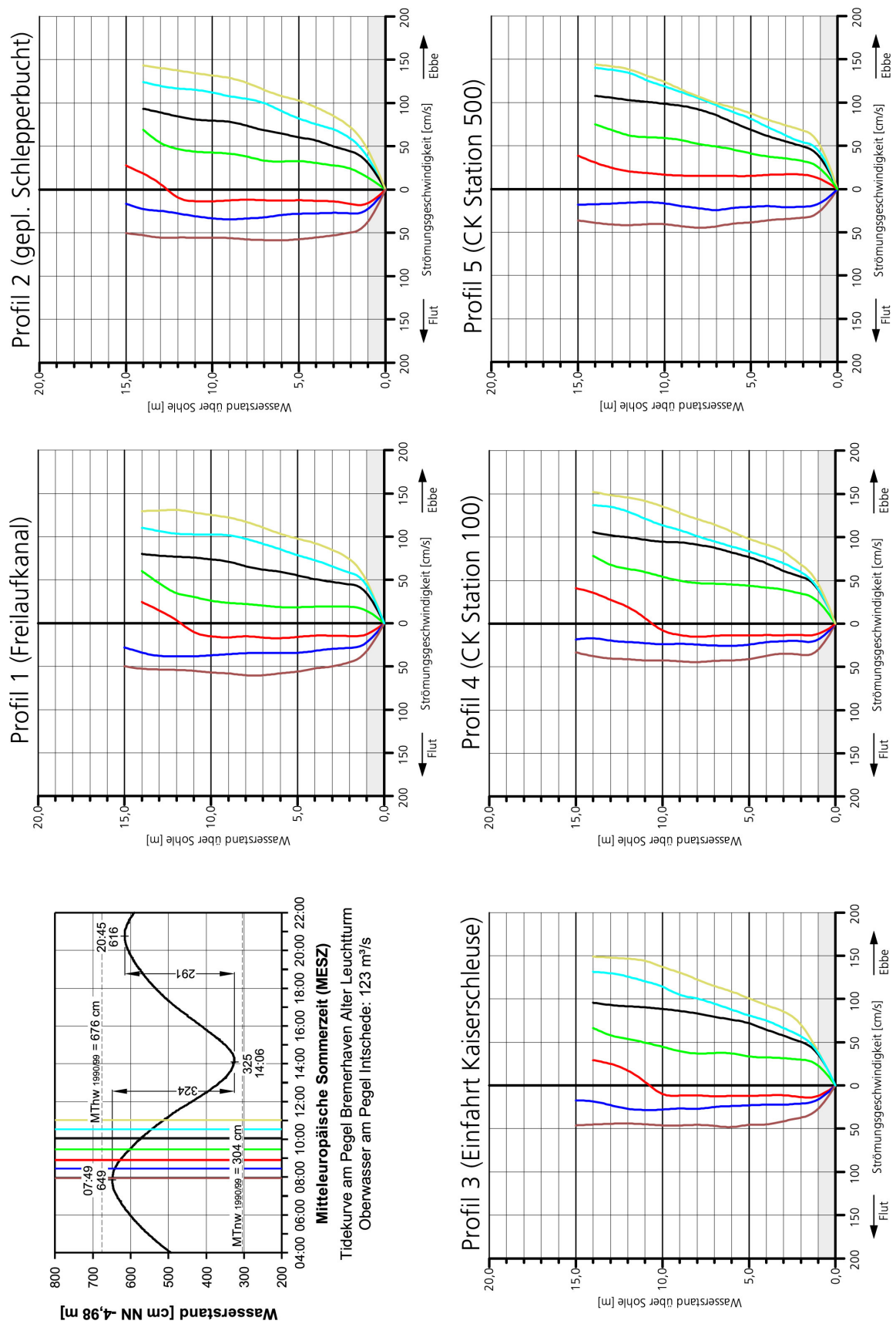


Abb. 42: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 12.10.2005

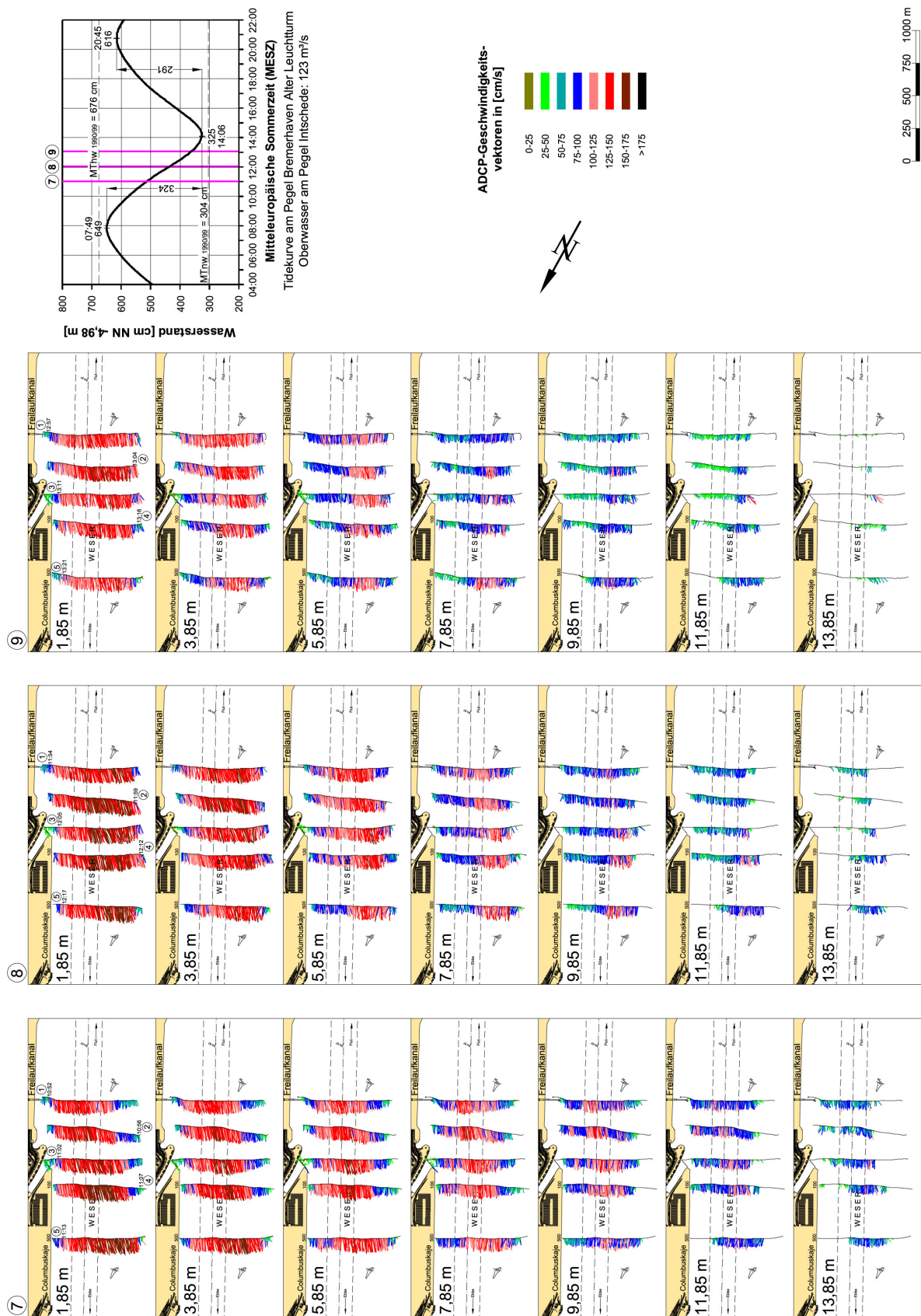


Abb. 43: Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 12.10.2005, 3. Ebbephase

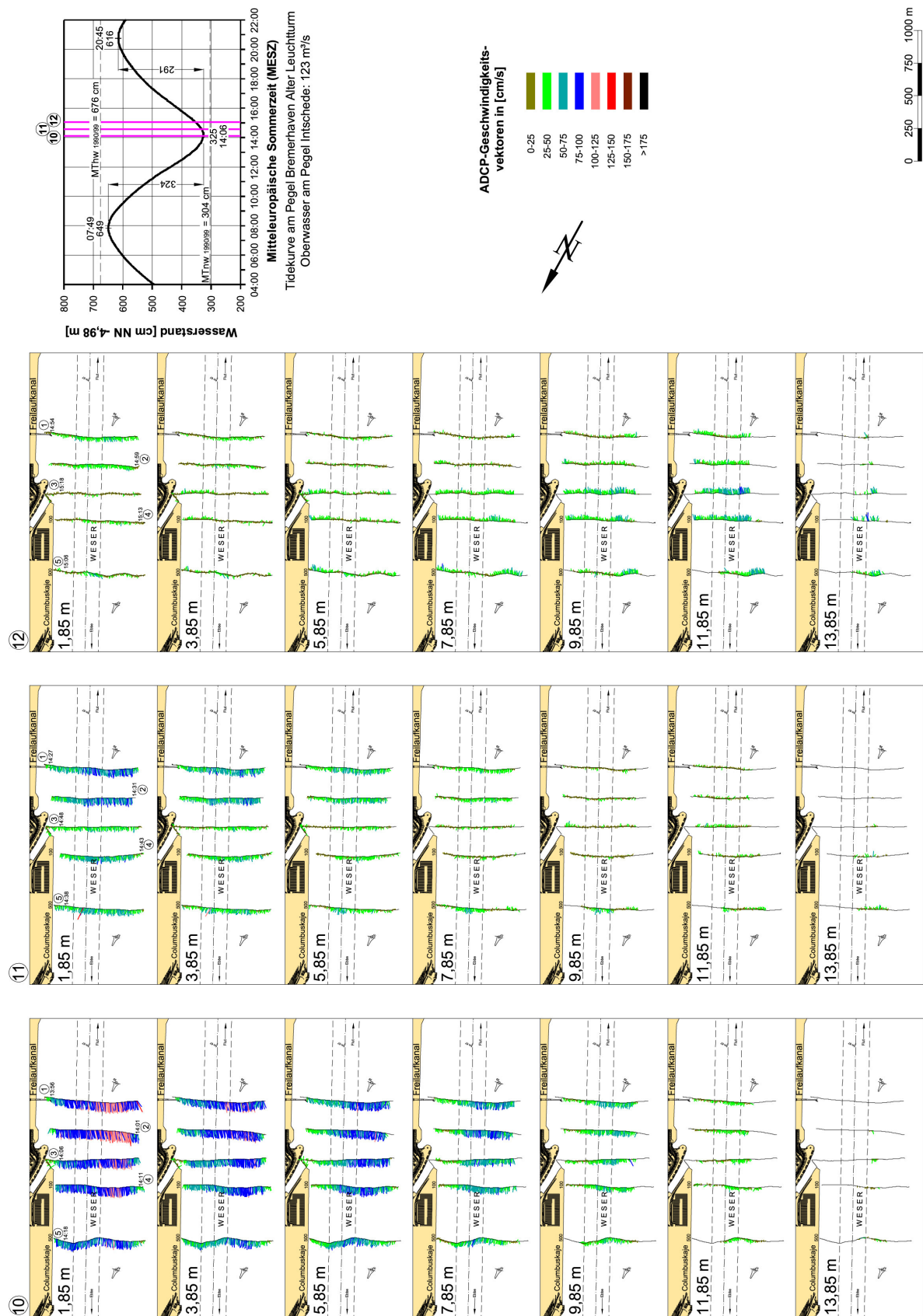


Abb. 44: Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 12.10.2005, letzte Ebbphase

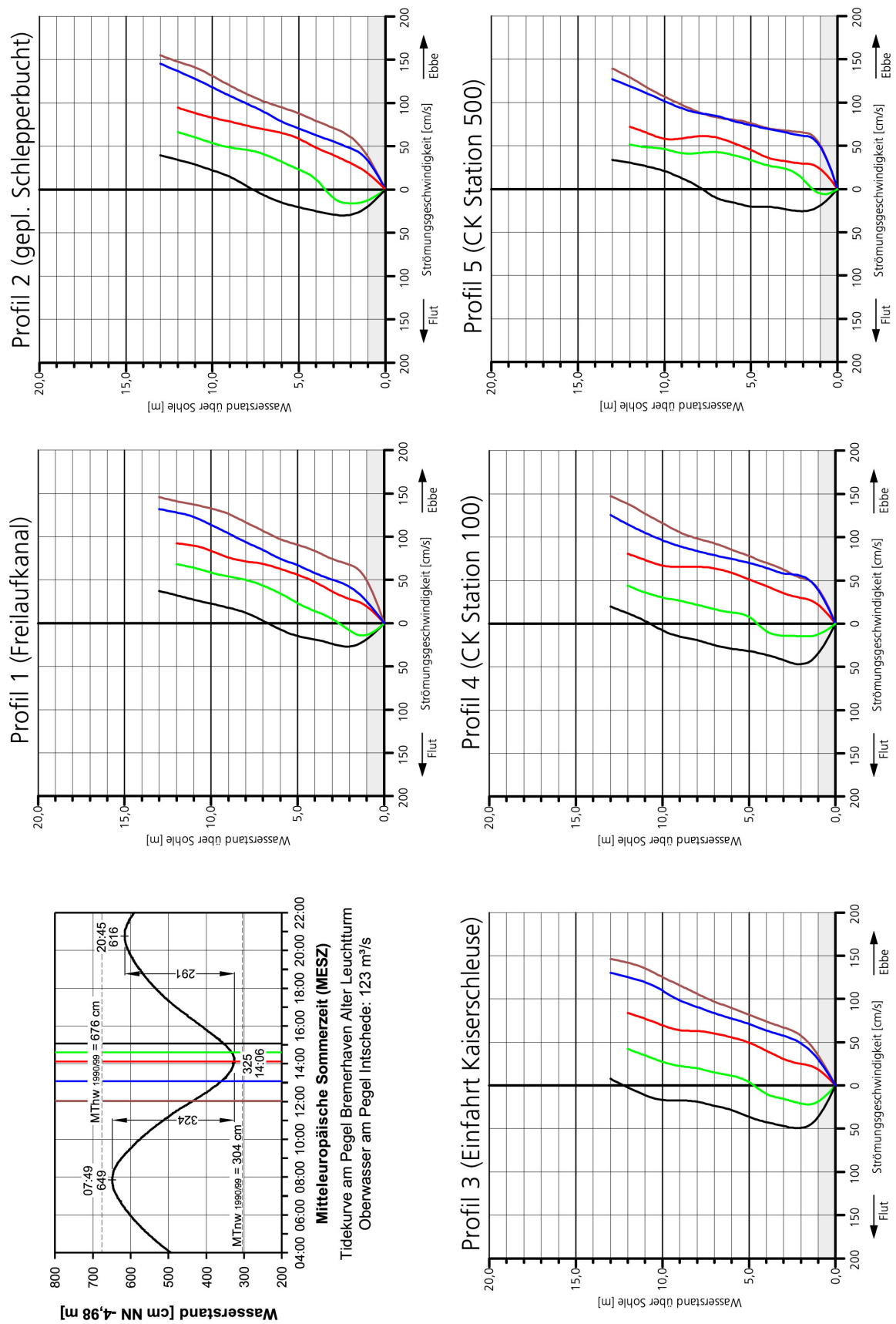


Abb. 45: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 12.10.2005

4.2.2 Salzgehalte

• Flutstromverhältnisse

Die tideabhängigen Salzgehalte sind in Abb. 46 dargestellt worden. Die Konzentrationen erhöhten sich im Tidestrom während der Flutdauer um rd. 13 ‰. Die Werte lagen zu Beginn der Messungen mit $S \approx 9 \text{ ‰}$ im mesohalinen und bei Eintritt des Thw mit $S \approx 22 \text{ ‰}$ im polyhalinen Bereich. Die insgesamt hohen Salzgehalte sind auf den geringen Zufluss von $Q_0 = 135 \text{ m}^3/\text{s}$ in das Tidegebiet zurückzuführen. Wesentlich für die Sedimenttransportvorgänge in der Weser und dem angrenzenden Vorhafenbereich der Kaiserschleuse sind die horizontalen und vertikalen Salzgehaltsverteilungen im Tideablauf und die sich daraus ergebenden Dichteströmungen. Aufgrund der geringeren Vorhafenabmessungen und Ausbautiefe sind die Austauschvorgänge im Bereich der Kaiserschleuse nicht so stark ausgeprägt wie bei der Nordschleuse.

Bei den ersten Messungen waren die Salzgehalte in der Weser (Pos. 1, 2 und 5) relativ gleichmäßig über die Tiefe verteilt (Messung 1 und 2 in Abb. 46). Die höheren Konzentrationen und stärkeren Gradienten in der Einfahrt (Pos. 3 und 4) weisen auf für die bis nach Tideniedrigwasser anhaltenden sohlennahen Dichteströmungen aus dem Vorhafen hin. Die relativ hohen Salzgehalte bei der ersten Messung wurden zusätzlich durch eine vorausgegangene Niedrigwasserschleusung verursacht. Dies wird im folgenden kurz begründet.

Bei einer Kammerfläche der Kaiserschleuse von $A \approx 9.400 \text{ m}^2$ und einem Hafenwasserstand von etwa +1,20 m NN (HBH Bremerhaven, 2000) wurden bei Thw (Tidewasserstand etwa -2,30 m NN) aus dem Überseehafen ein Schleusungswasservolumen von

$$V = \Delta H \cdot A = 3,50 \text{ m} \cdot 9.400 \text{ m}^2 = 32.900 \text{ m}^3$$

in den Vorhafen abgegeben. Schleusungsverluste werden bei hohen Tidewasserständen durch den Freilaufkanal ausgeglichen. Das hat entsprechend hohe Salzkonzentrationen im abgeschleusten Hafenbereich zur Folge. Bei niedrigem Oberwasser beträgt der Salzgehalt im Überseehafen $S > 20 \text{ ‰}$ (NASNER, 2004b). Folglich hat das Schleusungswasser die Salzkonzentrationen und damit die nach außen gerichteten Dichteströmungen verstärkt.

Während der Flutstromphase verändern sich die horizontalen und vertikalen Salzkonzentrationen im Untersuchungsbereich. Bei Tidehalbwasser (Messung 3) wurden vor der Columbuskaje (Pos. 5) deutlich höhere Salzgehalte gemessen als an den oberhalb gelegenen Positionen. Typisch sind die starken horizontalen und vertikalen Gradienten. Das erklärt auch die mit den ADCP-Profilen erläuterten ungleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilungen über die Wassertiefe (vgl. Abb. 35 und 36).

Außerdem überlagern sich ab Tidehalbwasser die Strömungs- und Dichteeffekte im Vorhafen. Mit der 4. Messung in Abb. 46 (Pos. 3 und 4) kann nachvollzogen werden, wie das salzigere Wasser unten in den Vorhafen eingetragen und im Austausch spezifisch leichteres Wasser oben zur Weser zurückfließt. Die höheren Salzgehalte im tieferen Wasser an der Ostmole (Pos. 3) gegenüber der Westmole (Pos. 4) sind auf die gegen den Uhrzeigersinn drehenden Flutstromwalzen

zurückzuführen.

Erst in der späteren Flutstromphase (Messung 5 und 6) werden die vertikalen und horizontalen Salzgradienten in der Weser schwächer. Das führt auch zur Vergleichmäßigung der Strömungsverteilungen (vgl. Abb. 37 und 39). Der Wasseraustausch zwischen Vorhafen und Weser setzt sich bis nach Eintritt des Thw fort. Dabei rücken die Salzgehaltsprofile mit sich erhöhender Konzentration enger zusammen (Messung 5 und 6). Dem geringer werdendem Gradienten entsprechend nimmt auch die Intensität der Dichteströmungen ab.

• Ebbestromverhältnisse

Bei den Salzgehalts- und Trübungsmessungen am 13. Oktober 2005 waren die Tide- und Oberwasserverhältnisse annähernd so, wie bei den Strömungsmessungen vom Vortag. Der Tidefall betrug 319 cm bei einem Oberwasser in Intschede von $Q_0 = 124 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die bei Thw gemessenen Salzgehalte an den 5 Positionen (Abb. 47, Messung 1) stimmen mit den entsprechenden Profilen der Flutmessung überein (vgl. Abb. 46, Messung 6). Bemerkenswert sind die geringen Vertikalgradienten und die annähernd gleichen Konzentrationen an allen Positionen im tieferen Wasser.

Auffallend sind die sich während der Ebbestromdauer einstellenden relativ starken Vertikalgradienten bis zur Kenterung. In der Weser verringerten sich die Salzgehalte kontinuierlich während der Ebbestromphase an der Sohle um $\Delta S \approx 22 - 14 = 8 \text{ ‰}$ und an der Oberfläche um $\Delta S \approx 20 - 10 = 10 \text{ ‰}$. Die stärkere Schichtung der Salzgehalte kann auch auf die geringere turbulente Durchmischung bei Nipptiden zurückgeführt werden (STÜCKRATH, 1970; BARG, 1979).

Stärkere horizontale Salzgefälle zwischen Pos. 5 und Pos. 1 wurden in dem rd. 1 km langen Untersuchungsabschnitt während der Hauptebbestromphase in den oberen Wasserschichten festgestellt (Messung 3 bis 5, Abb. 47). Die in Abb. 43 dargestellten Strömungsvektoren (Messung 7 bis 9) zeigen, dass die Ebbewassermengen im Bereich der Kaiserschleuse nach Westen abgelenkt werden.

Bei den gleichen Messungen (3 bis 5) waren die Salzkonzentrationen in der Vorhafeneinfahrt (Pos. 3 und 4) höher als an den Positionen 2 und 1 was auf die Austauschvorgänge zwischen Vorhafen und Weser hinweist.

4.2.3 Schwebstoffe

• Flutstromverhältnisse

Die aus den Trübungsmessungen berechneten Schwebstoffverteilungen sind in Abb. 48 dargestellt.

Bei der ersten Messung sind die höheren Schwebstoffkonzentrationen in der Vorhafeneinfahrt (Pos. 3 und 4) auf die ebbeorientierten Dichteströmungen und eine zuvor getätigte Niedrigwasserschleusung zurückzuführen. Die relativ hohen Schwebstoffgehalte im Bereich der Kaiserschleuse bei der zweiten Messung können ebenfalls nicht mit den hydrodynamischen und morphologischen Vorgängen in der frühen Flutphase erklärt werden.

Mit sich voll ausprägenden Flutstromverhältnissen etwa ab Tidehalbwasser stellen sich in der Vorhafeneinfahrt (Pos. 3 und 4) höhere Schwebstoffmengen als in der Weser ein. Das ist auf das mit den Walzen- und Dichteeffekten resuspendierte Sohlenmaterial in der Schleusenzufahrt erklärt. Die höchsten Suspensionen wurden dort auch bei fortschreitender Flut bis nach Tidehochwasser festgestellt.

Im flachen Wasser vor der Columbuskaje wurden die höheren Konzentrationen (Pos. 5) nach Tidehalbwasser registriert (Messung 4 in Abb. 48). Das ist mit der Verlagerung der Flutströmung in die oberen Tiefenzellen während der fortgeschrittenen Flutphase erklärt. Relativ geringe Konzentrationen wurden dagegen im strömungsberuhigteren Bereich vor dem Freilaufkanal ermittelt (Pos. 1).

Die bis nach Thw andauernden Dichteeffekte sind ursächlich für die höheren Konzentrationen in der Hafeneinfahrt. Vor dem Freilaufkanal gingen die Feststofffrachten in den oberen Wasserschichten bis auf rd. 350 mg/l zum Eintritt des Thw zurück (Messung 6).

• Ebbestromverhältnisse

Die zwischen Freilaufkanal und Columbuskaje ermittelten Schwebstoffgehalte sind in Abb. 49 dargestellt.

Den hydrologischen Randbedingungen entsprechend (Nipptide und niedriges Oberwasser) wurden im Untersuchungsgebiet während der Ebbe nur kleine Suspensionsmengen ermittelt. Bei dem geringen Oberwasser im Oktober 2005 lag die Trübungszone der Tideweser oberhalb von Bremerhaven.

Ab Thw verringerten sich die Schwebstoffgehalte in der Weser bis auf $C_s \approx 50$ mg/l (Abb. 49, Messung 1 und 2). Lediglich an der westlichen Vorhafeneinfahrt wurden aufgrund der Strömungs- und Dichteeffekte etwas höhere Konzentrationen festgestellt.

Während der Ebbestromphase betrugen die Feststoffanteile im Tidestrom $C_s < 200$ mg/l (Messung 3 bis 5). Die Ergebnisse in Abb. 49 zeigen, dass in der Hauptebbestromphase (Pos. 4, Messung 3 und 4) nur geringe Austauschvorgänge stattgefunden haben.

Die relativ gleichmäßige Verteilung über die Wassertiefe ist mit den vorstehend beschriebenen, während der Ebbe andersartigen Strömungs- und Salzgehaltsverteilungen erklärt. Die brackwasserbedingten Einflüsse führen zur Schwächung der Sohlströmungen während der Ebbestrom-

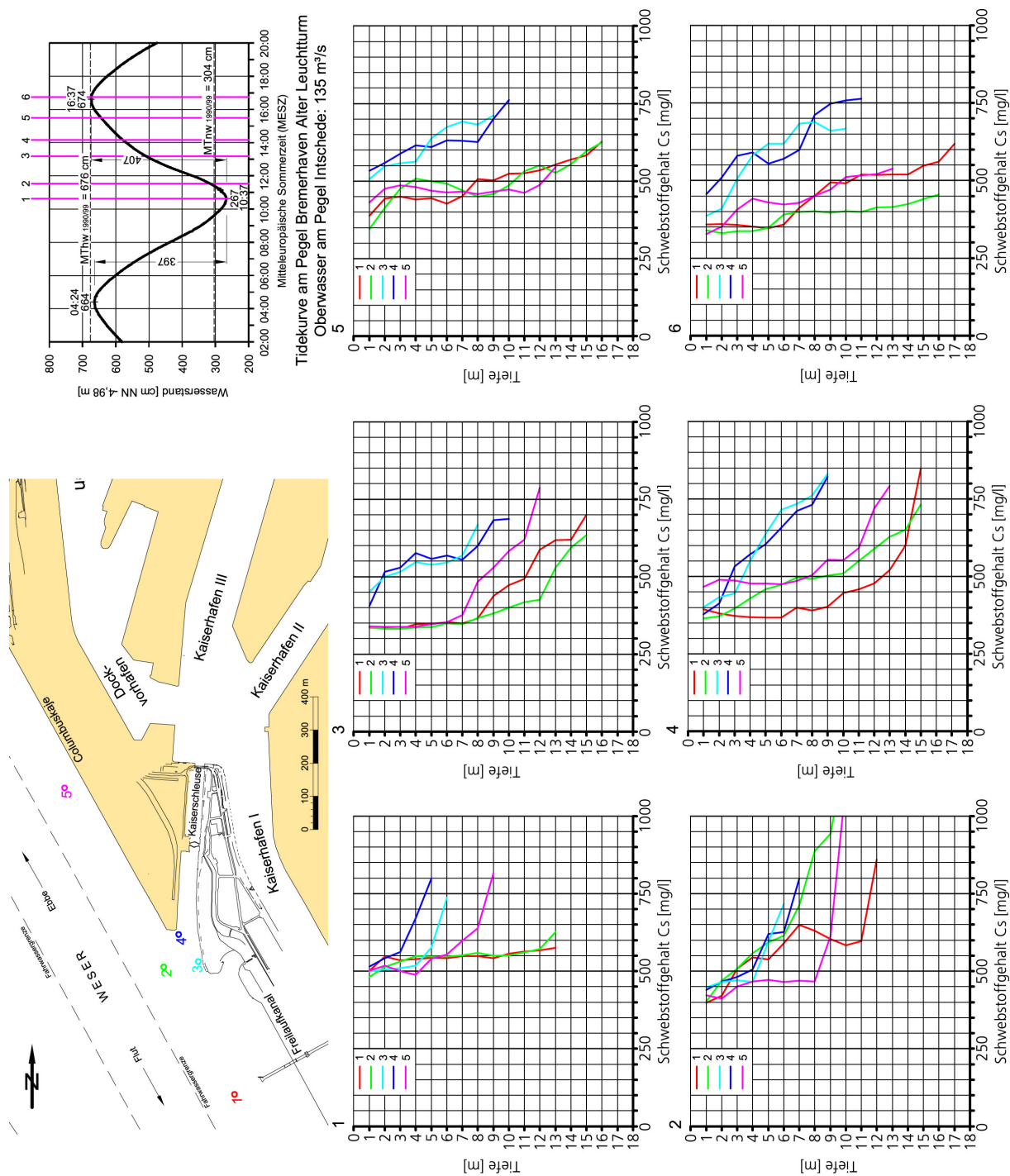


Abb. 48: Schwebstoffe im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, Flutmessung am 07.10.2005

und zur Verstärkung in der Flutstromphase mit entsprechend höheren Schwebstoff- und Geschiebemengen. Deshalb ist der resultierende Sedimenttransport im Untersuchungsgebiet stromauf gerichtet. Die Verhältnisse kehren sich erst bei hohen Abflüssen aus dem Binnenland um ($Q_o > 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$) (NASNER, 1991). Die höheren Schwebstofffrachten in der Weser während der Flut und bei Springtiden wurden mit Langzeituntersuchungen bei niedrigem Oberwasser nachgewiesen (VISSCHER und WOLTERING, 1998).

Bei Nipptiden und vergleichbaren Oberwasserbedingungen liegen übrigens auch in der Weser oberhalb der Nordschleuse ähnliche Feststoffverhältnisse vor (NASNER, 2005). Aufgrund der größeren Vorhafenabmessungen und Ausbautiefe des Vorhafens der Nordschleuse wurden dort allerdings stärkere Austauschvorgänge festgestellt.

4.2.4 Strömungen im Vorhafen

• Flutströmungen

Am 17. Oktober 2001 betrug der Springtidehub 424 cm bei einem Oberwasser von $Q_o=189 \text{ m}^3/\text{s}$ Abb. 50 und 51. Die hydrologischen Randbedingungen sind vergleichbar mit denen bei der Flutmessung vor der Nordschleuse im Mai 2001 (vgl. Abb. 26 und 27). Insgesamt sind die Strömungsvorgänge im Vorhafen der Kaiserschleuse ähnlich wie vor der unterhalb gelegenen Nordschleuse.

Die Bewegungsvorgänge sind vor der Kaiserschleuse im Tideablauf jedoch schwächer ausgeprägt. Das liegt an den geringeren Vorhafenabmessungen, der Ausbautiefe und den veränderten morphologischen Randbedingungen im Tidestrom.

Das gilt auch für die ebbeorientierten Dichteströmungen bei Tideniedrigwasser. Im Vorhafen der Kaiserschleuse waren die Geschwindigkeiten deutlich schwächer ausgeprägt (Abb. 50, Messung 1) als die Ein- und Ausströmungen vor der Nordschleuse (vgl. Abb. 26, Messung 1).

Übereinstimmend mit den Beobachtungen an der Nordschleuse kehren sich die Strömungs- und Dichteeffekte auch im Vorhafen der Kaiserschleuse etwa bei $T_{\frac{1}{2}w}$ um und stabilisieren sich, allerdings auf schwächerem Niveau, in der zweiten Hälfte der Flutstromphase (Abb. 51 und 27). Trotz der insgesamt weniger intensiven Dichteströmungen sind die Auswirkungen in den oberflächennahen Tiefenzellen bei Thw auch außerhalb der Hafeneinfahrt in Abb. 51 (Messungen 5 und 6) zu erkennen.

• Ebbeströmungen

Die in Abb. 52 und 53 aufgetragenen Ebbmessungen wurden bei einem Tidefall von 306 cm vorgenommen. Das Oberwasser betrug $Q_o=191 \text{ m}^3/\text{s}$. Es herrschten damit etwa die gleichen Bedingungen wie bei den Messungen vor der Nordschleuse (vgl. Abb. 28 und 29).

Die Strömungsvorgänge im Tidestrom und im Vorhafen der Kaiserschleuse waren auch bei den Ebbmessungen weniger stark ausgeprägt als im Bereich der Nordschleuse. Im Vorhafen der Kaiserschleuse waren bei einsetzendem Ebbestrom (1. Messung in Abb. 52) keine nennenswerten Strömungsgeschwindigkeiten zu verzeichnen.

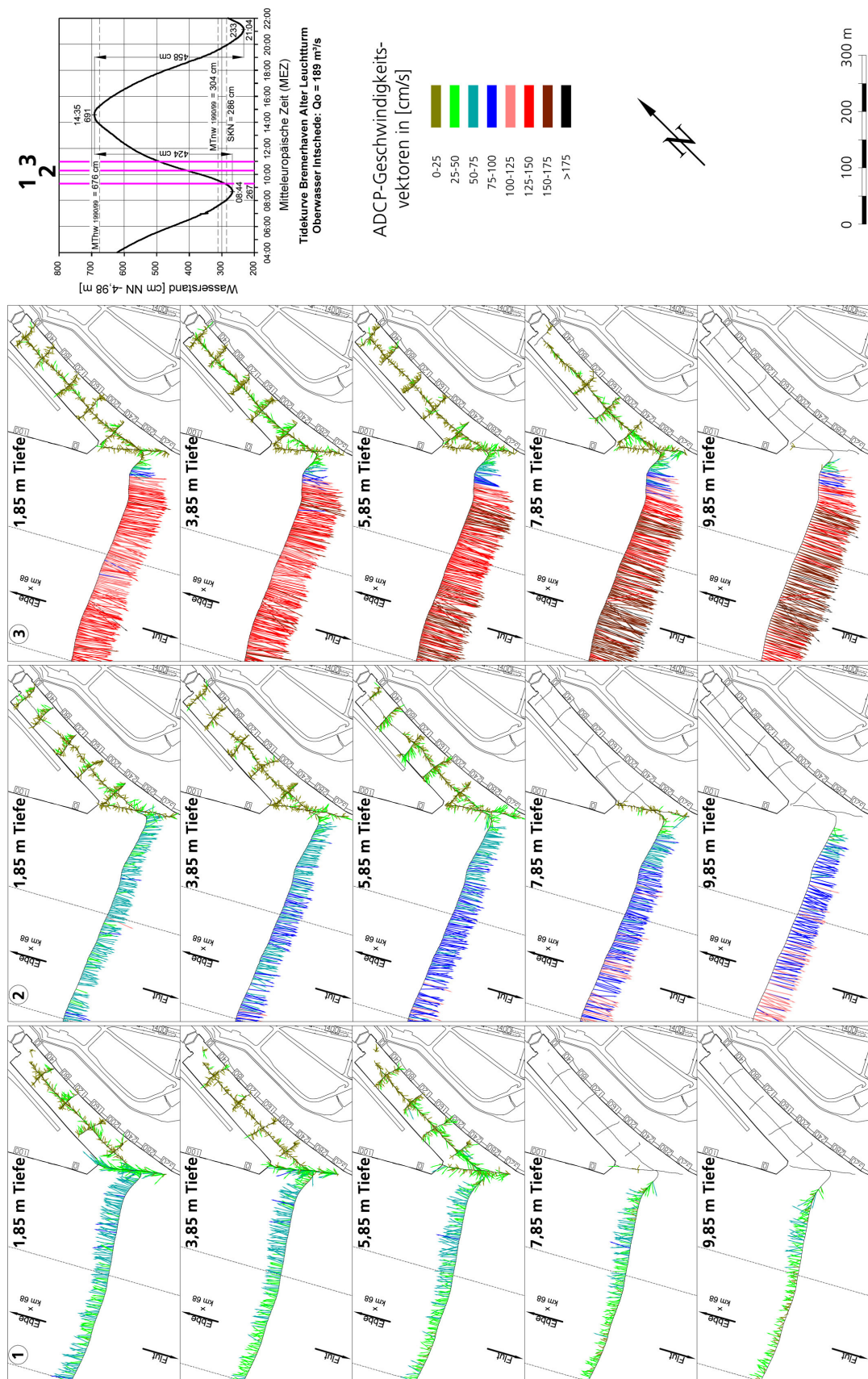


Abb. 50: Flutströmungen vor der Kaiserschleuse in Bremerhaven am 17.10.2001

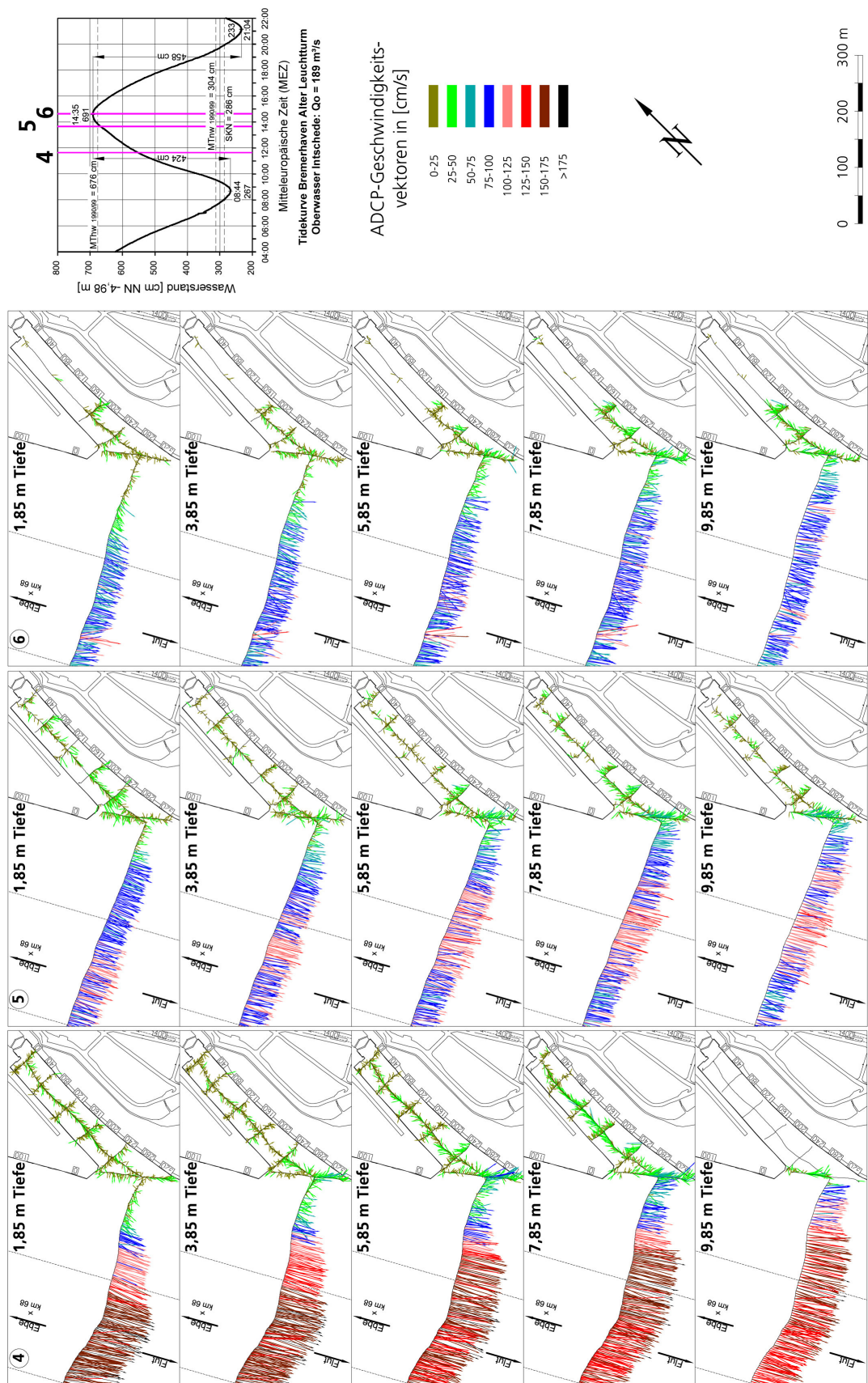


Abb. 51: Flutströmungen vor der Kaiserschleuse in Bremerhaven am 17.10.2001

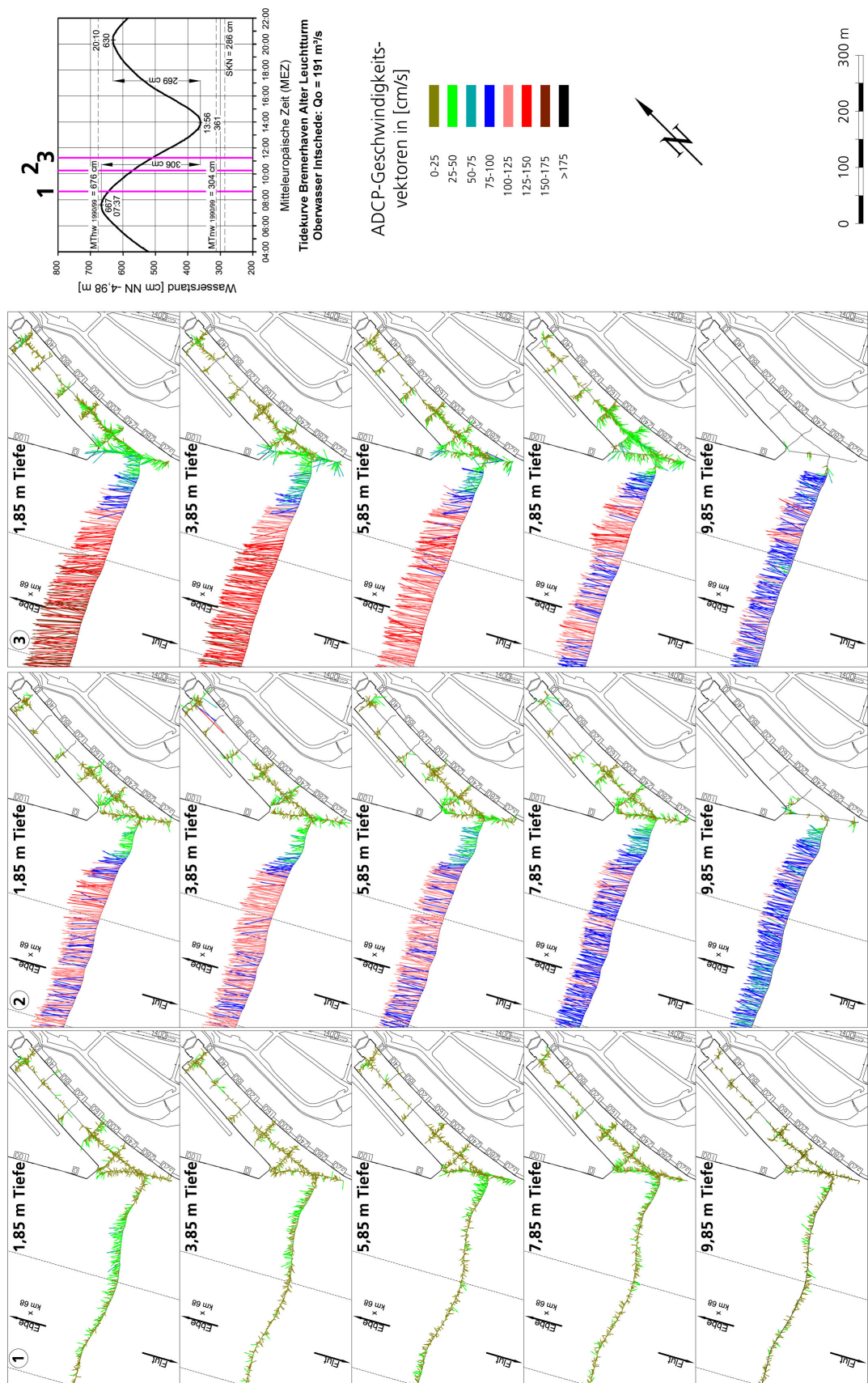


Abb. 52: Ebbeströmungen vor der Kaiserschleuse in Bremerhaven am 25.10.2001

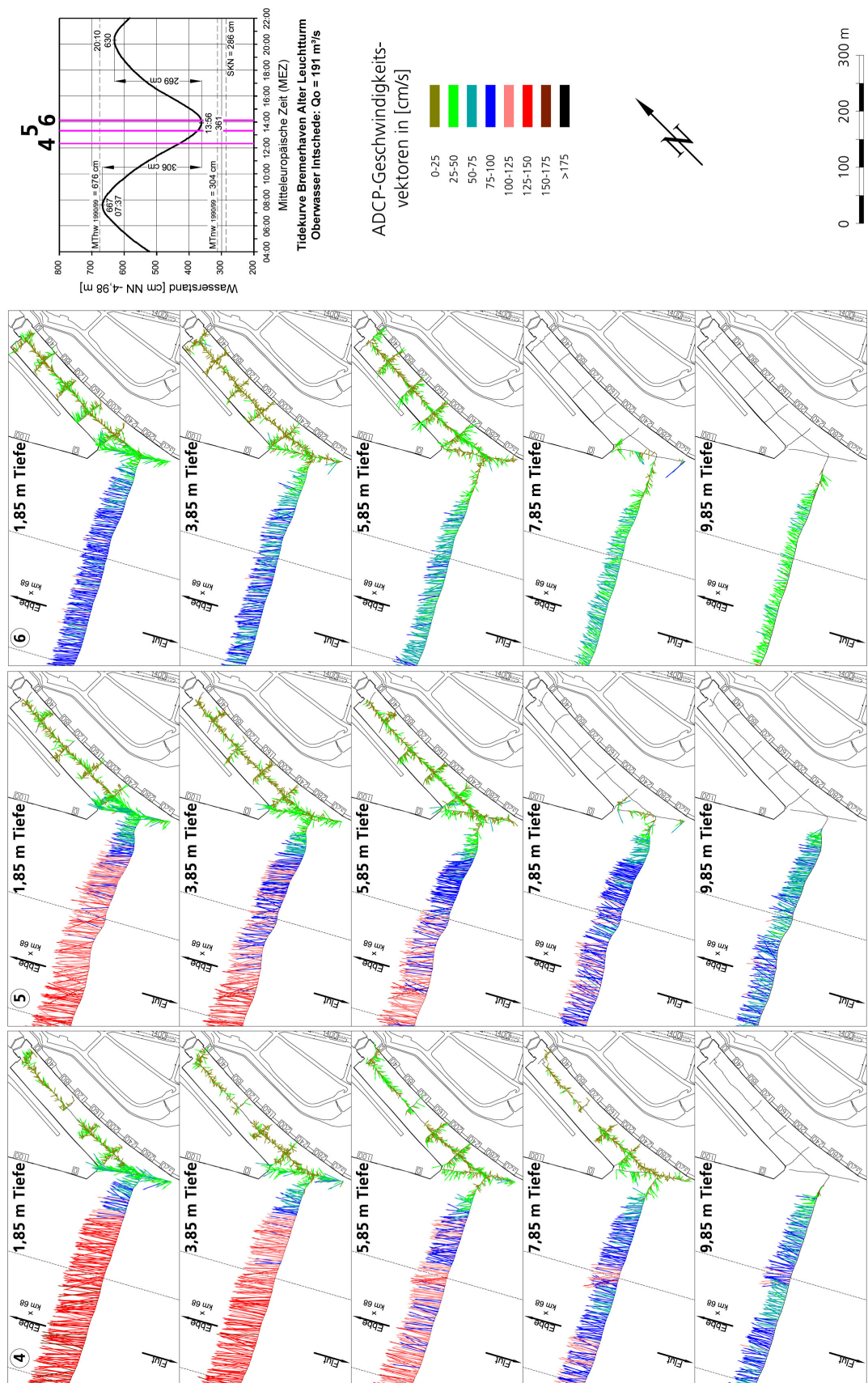


Abb. 53: Ebbeströmungen vor der Kaiserschleuse in Bremerhaven am 25.10.2001

Bemerkenswert ist es, wie sich auch im Vorhafen der Kaiserschleuse etwa bei $T_{\frac{1}{2}w}$ die ebbeorientierten Strömungs- und Dichteeffekte einstellen (Abb. 52, Messung 3). An der Oberfläche wird das spezifisch leichtere Wasser über die Walzenströmungen in den Vorhafen eingetragen. Durch den damit angeregten Dichteeffekt wird das in den tieferen Schichten noch vorhandene spezifisch schwerere Wasser aus dem Vorhafen in die Weser transportiert.

In der anschließenden Ebbestromphase stabilisieren sich die Dichteströmungen bis zum Eintritt des T_{nw} (Abb. 53). Sie sind übrigens wie im Vorhafen der Nordschleuse zum Ende der Ebbestromphase mehr auf die oberen und unteren Wasserschichten konzentriert. Bei Tideniedrigwasser sind die Einstömungen in der oberen Tiefenzelle (1,85 m) und die Ausströmungen in der unteren (5,85 m) auszumachen. Im Zentrum der Dichtestromwalze, in den dazwischen liegenden Wasserschichten, sind nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten erkennbar.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass die Strömungs- und Dichteeffekte in den Vorhäfen der Nord- und Kaiserschleuse in sich vergleichbar sind. Aufgrund der kleineren Abmessungen der Ausbautiefe und der anderen Bedingungen im Tidestrom sind sie im Bereich der Kaiserschleuse insgesamt schwächer ausgeprägt.

Für beide Vorhäfen gilt, dass sich die tideabhängigen Walzen- und Dichteströmungen etwa ab Tidehalbwasser einstellen und bis zu den jeweiligen Strömungskenterungen Bestand haben.

4.2.5 Salzgehalte

- **Flutstromverhältnisse**

Bei den Salzgehaltsmessungen vor der Kaiserschleuse vom 23. Oktober 2001 betrug der Tidehub 335 cm mit einem zugehörigen Oberwasser von $Q_o=182 \text{ m}^3/\text{s}$.

Übereinstimmend mit den Untersuchungen vor der Nordschleuse sind auch im Vorhafen der Kaiserschleuse bei Tideniedrigwasser höhere Salzkonzentrationen als in der Weser anzutreffen (Messung 1, Abb. 54). Mit den ebbeorientierten Dichteströmungen wird das salzhaltigere Wasser in den unteren Wasserschichten zeitverzögert aus den Vorhäfen transportiert. In dieser Tidephase sind die Salzgehalte im Strom geringer als im Vorhafen. Bis zur Ebbestromkenterung hatte die Salzkonzentration in der Weser noch weiter abgenommen (Messung 2 in Abb. 54). Die höheren Werte bei den Positionen 1 bis 5 sind auf eine Niedrigwasserschleusung zurückzuführen.

Mit dem einsetzenden Flutstrom beginnt die Umkehrung des horizontalen Salzgradienten (Abb. 54, 3. Messung). Im Fahrwasser beträgt die vertikale Salzgehaltsdifferenz bereits etwa 4 ‰.

Bis zur 4. Messung, etwa bei $T_{\frac{1}{2}w}$ prägen sich die starken Vertikal- und Horizontalgradienten aus. Dadurch werden die flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen im Vorhafen angeregt, die bis zur Flutstromkenterung andauern.

Der Dichteunterschied bei den Messpunkten im Vorhafen von bis zu $\Delta S \approx 4 \text{ ‰}$ ist darauf zurückzuführen, dass das spezifisch schwerere Wasser am Staupunkt unten in den Vorhafen strömt und das weniger salzhaltigere Wasser aus den oberen Wasserschichten heraus transportiert wird.

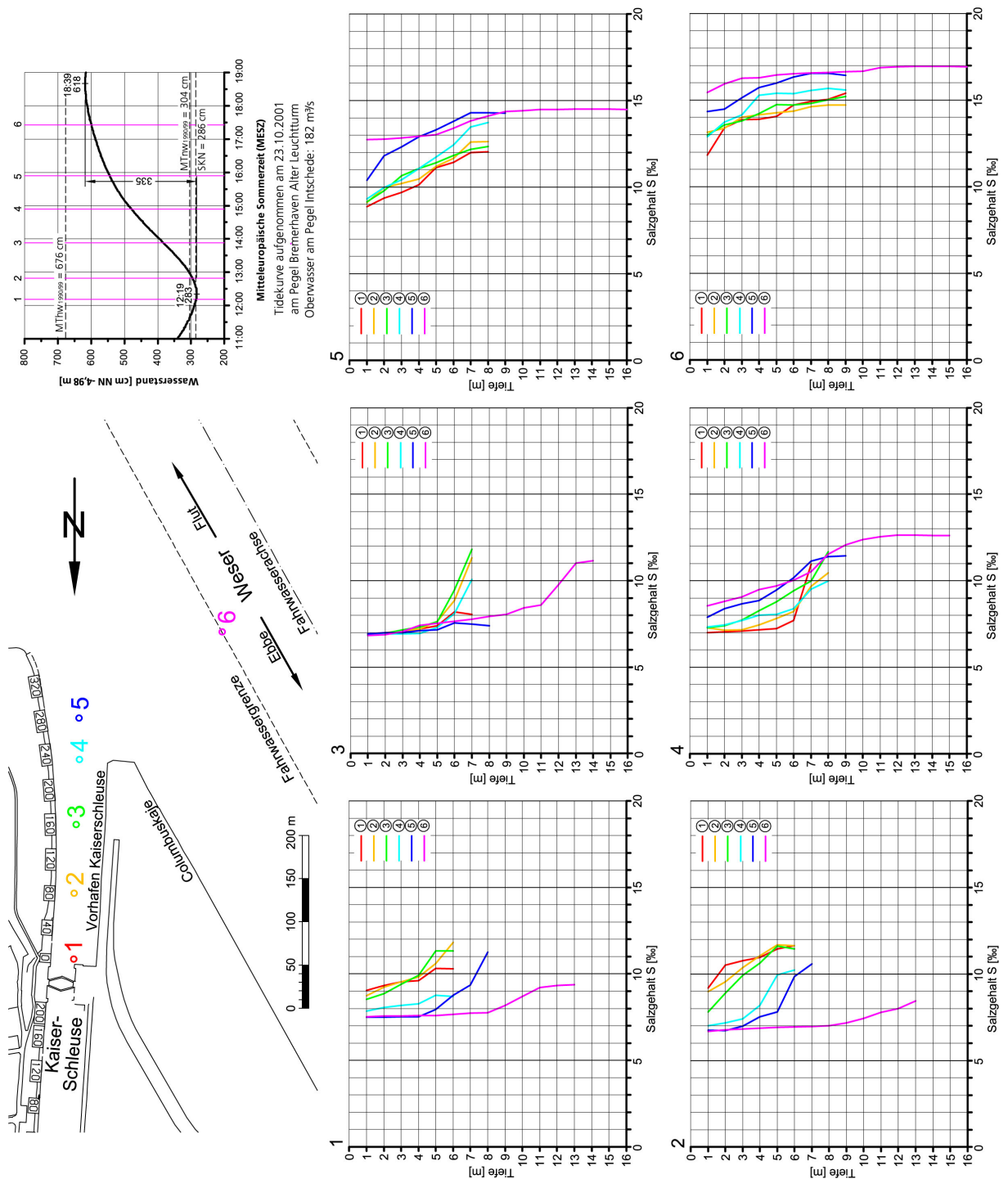


Abb. 54: Salzgehalte im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven,
Flut am 23.10.2001

Bezeichnend ist der mit zunehmender Flutdauer schwächer werdende Vertikalgradient in der Weser im Gegensatz zu den Profilen im Vorhafen, vor allem in der Einfahrt (Pos. 5 in Abb. 54). Wie bei der Nordschleuse werden im Vorhafen phasenverschoben die Konzentrationen im Tidestrom erreicht.

- **Ebbestromverhältnisse**

Die Salzgehaltsverhältnisse bei dem Nipptidefall vom 26. Oktober 2001 und $Q_o=193 \text{ m}^3/\text{s}$ sind in Abb. 55). dargestellt. Nach Thw besteht nur noch ein geringes Gefälle zwischen Weser und Vorhafen (Messung 1, Abb. 55). Die Differenzen von bis zu $\Delta S \approx 4 \text{ ‰}$ in den Vertikalen geben einen Hinweis auf die zu dieser Tidephase noch vorhandenen flutorientierten Dichteströmungen. Die einsetzende Ebbeströmung ist mit der 2. Messung nachvollziehbar. An der Oberfläche hat sich das horizontale Salzgefälle bereits gekehrt. Die höchsten Konzentrationen sind am Außenhaupt (Pos. 1) und die geringsten bei Pos. 6. An der Sohle besteht noch ein umgekehrtes Gefälle.

Die Profile in der Weser ab der dritten Stunde nach Thw (Abb. 55, Profil 3 und folgende) erklären die verstärkten Oberflächenströmungen während der Ebbestromphase. Die Salzgehaltsunterschiede erreichen im Tidestrom Werte bis zu $\Delta S \approx 6 \text{ ‰}$. Bezeichnend ist die deutliche Trennung zwischen den Wasserschichten unterschiedlichen Salzgehalts.

Mit der Zunahme des horizontalen Salzgefälles vom Strom zum Vorhafen entwickeln sich die rechtsdrehenden Walzenströmungen und durch das damit in den oberen Tiefenzellen einströmende „leichte“ Wasser gleichzeitig die zur Ebbestromphase zugehörigen Dichteströmungen. Die mit fortschreitender Ebbedauer in Abb. 55 aufgetragenen Salzgehaltsprofile erklären, weshalb der Dichteeffekt bis nach dem Eintritt des Thw aufrecht erhalten wird.

4.2.6 Schwebstoffe

- **Flutstromverhältnisse**

Die tideabhängigen Schwebstoffverhältnisse im Vorhafen zur Kaiserschleuse sind beispielhaft für den Flutast der Tide vom 23. Oktober 2001 in Abb. 56 dargestellt. Der Tidehub betrug 335 cm bei einem Oberwasser von $Q_o=182 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Schwebstoffkonzentrationen waren in der Weser (Pos. 6 in Abb. 56) bei der Oktobermessung insgesamt geringer als bei der Springtide vom Mai 2001 (vgl. Abb. 32). Für die tideabhängigen Feststoffanreicherungen in den Vorhäfen spielt jeweils die vorausgegangene Entwicklung eine Rolle.

Mit den während der Flutstromphase über die Walzenströmungen sohlennah eindringenden Wassermengen werden die Schwebstoffe aus dem Strom in die Vorhäfen eingetragen. Gleichzeitig bewirken die hydrodynamischen Kräfte, dass die aus den vorausgegangenen Tiden bereits vorhandene Feststoffmengen resuspendiert werden. Die positive Feststoffbilanz verringert sich mit zunehmendem Sättigungsgrad in den Vorhäfen.

Bis rd. 2 Stunden nach Tideniedrigwasser wurden im Vorhafen zur Kaiserschleuse relativ geringe

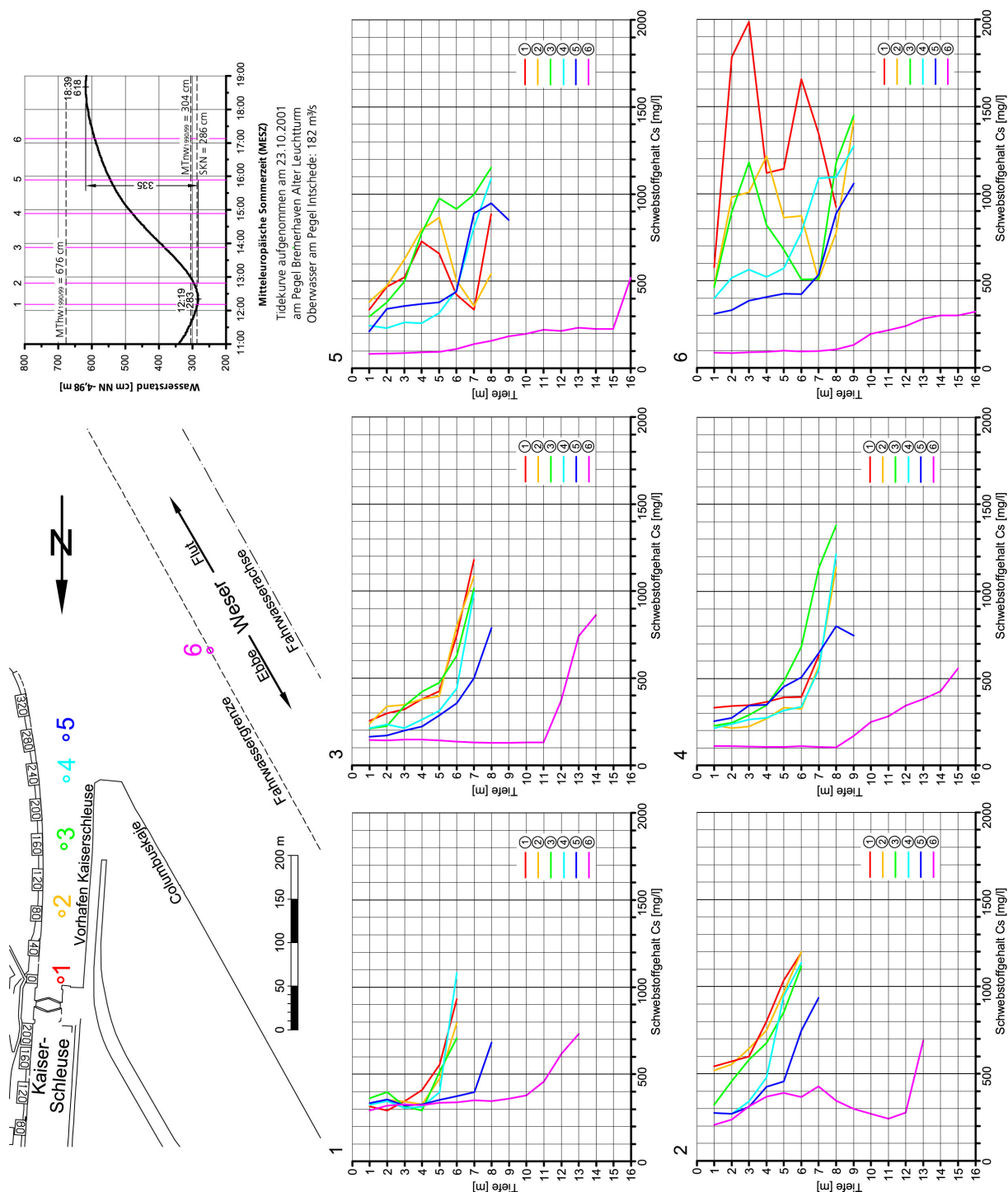


Abb. 56: Schwebstoffe im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, Flut am 23.10.2001

Trübungen festgestellt (Messung 1 bis 3 in Abb. 56). Aufgrund des besonderen Sinkverhaltens waren die Feststoffkonzentrationen insgesamt höher als in der Weser.

Mit dem Einsetzen des vollen Flutstroms kommt es durch die Anfachung der Walzen- und Dichteströmungen im Vorhafen zur Resuspensierung und stärkeren Durchmischung der Feststoffpartikel (ab Messung 4 in Abb. 56). In der folgenden Tidephase wird die Feststoffkonzentration mit Werten von $C_s > 1000 \text{ mg/l}$ zunehmend erhöht. Die starke turbulente Durchmischung ist auch auf die geringere Ausbautiefe des Vorhafens zurückzuführen.

Kennzeichnend sind die hohen Schwebstoffanreicherungen in der späteren Flutstromphase im inneren Vorhafen besonders vor dem Binnenhaupt mit maximalen Schwebstoffgehalten von $C_s \approx 2000 \text{ mg/l}$ (Messung 6, Abb. 56; vgl. auch Messung 5 und 6, Abb. 32).

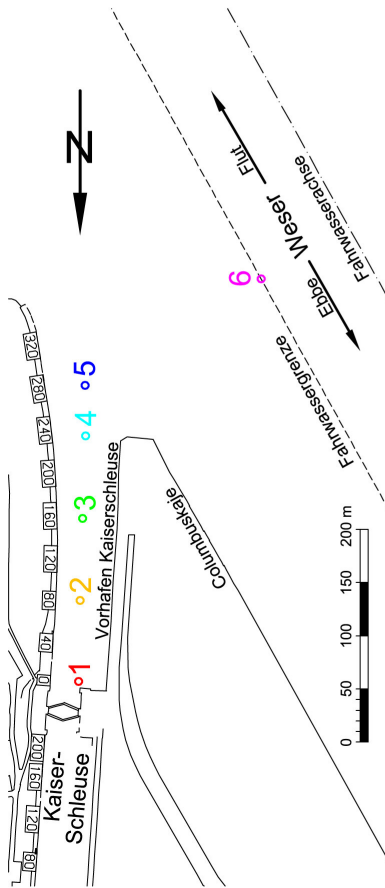
Dieser Umstand erklärt sich mit den in dieser Tidephase besonders ausgeprägten sohlennah eindringenden Dichteströmungen, die am Binnenhaupt gekehrt werden. Übereinstimmend ist für die Vorhäfen der Nord- und Kaiserschleuse festzustellen, dass starke Feststoffkonzentrationen insbesondere bei hohen Tidewasserständen während der Flut auftreten.

• Ebbestromverhältnisse

Mit den vor der Kaiserschleuse durchgeführten Trübungsmessungen bei der Nipptide vom 26.10.2001 (Tidefall 280 cm, $Q_o=193 \text{ m}^3/\text{s}$) werden die Ergebnisse vom Vorhafen der Nordschleuse grundsätzlich bestätigt (Abb. 57 und 33). Während der Ebbe wurden in der Weser relativ geringe Konzentrationen ($C_s < 150 \text{ mg/l}$) registriert.

Auch im Vorhafen der Kaiserschleuse lagen die absoluten Werte insgesamt deutlich unter den bei Flutstrom gemessenen Größenordnungen. Geringfügige Störungen (z. B. Messung 2, Abb. 57) können dabei auf Schleppermanöver vor dem Binnenhaupt zurückgeführt werden. Die insgesamt etwas stärkeren Durchmischungen in der zweiten Ebbestromphase bis nach Eintritt des Tnw gegenüber der Nordschleuse sind mit den Dichteströmungen in Verbindung mit der geringen Ausbautiefe zu erklären.

Die in situ Untersuchungen haben für beide Vorhäfen in Bremerhaven ergeben, dass es im Tiderhythmus bei Flutstrom zu besonders hohen Konzentrationen in der zweiten Fluthälfte kommt. Mit der Analyse der Salzgehalte im Strom und den angrenzenden Vorhäfen wurde auch ein besserer Einblick in die damit verbundenen, komplexen Strömungsverhältnisse gewonnen. Mit der genaueren Kenntnis der Überlagerungen von Strömungs- und Dichteeffekten während der Flut- und Ebbestromphasen jeweils ab etwa Tidehalbwasser können die morphologischen Vorgänge erklärt werden.



82

4.3 Bremerhaven Doppelschleuse

4.3.1 Strömungsmessungen

In der Geestemündung und dem Vorhafen zur Doppelschleuse liegen besondere Bedingungen vor. Die Sedimentationen in der Geeste werden durch das rd. 600 m oberhalb gelegene Sturmflutsperrwerk (vgl. Abb. 3) und eine Barre an der Mündung beeinflusst (Abb. 9). Durch die mit dem Bau des Sperrwerks verursachte Teilabdämmung ist der mittlere Flutstromquerschnitt A_{fm} (m^2) und damit auch die Flutwassermenge T_f (m^3) erheblich verringert worden.

Wenn man die Tidewassermenge T_f die während der Flut in die Geeste einströmt durch den mittleren Flutstromquerschnitt A_{fm} und die Flutstromdauer D_f (s) teilt, erhält man einen Wert c (cm/s), der als „Gleichgewichtsgeschwindigkeit“ bezeichnet werden kann.

$$c = \frac{T_f}{A_{fm} \cdot D_f} \text{ (cm/s)}$$

Bei gleich bleibender Flutstromdauer D_f verringert sich T_f wegen des durch den Sperrwerksbau verkleinertem Querschnitt A_{fm} bis der ursprüngliche c -Wert wieder erreicht wird (HENSEN, 1963). Deshalb kommt es unterhalb des Sturmflutsperrwerks in der Geeste zu erheblichen Sedimentationen (NASNER, 1989). Der Geesteabschnitt zwischen Sturmflutsperrwerk und Mündung verhält sich ähnlich wie ein tidebeeinflusster Vorhafen. Die geringen Oberwassermengen der Geeste erzeugen keinen Spül- oder Räumungseffekt.

• Flutströmungen

Am 28. Juni 2006 betrug der Springtidehub am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm 409 cm und das Oberwasser der Weser in Intschede $Q_0 = 207 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 58).

Mit Abb. 58 wird die nach T_{nw} einsetzende Ebbestromkenterung in der Weser dokumentiert. Im Vorhafen sind in dieser Tidephase nur geringe Wasserbewegungen zu beobachten. Bis zur Kenterung strömt das Wasser in den oberen Schichten, entlang der nördlichen Mole der Geeste in den Vorhafen (Messung 1). Mit einsetzendem Flutstrom wird das Wasser vom Staupunkt aus entlang der Südmole in den Vorhafen gelenkt. Wie vor der Nord- und Kaiserschleuse setzt sich die Ebbestromkenterung und der Flutstrom dichtebedingt von den unteren zu den oberen Wasserschichten durch (Abb. 58, Messung 1 und 2). Bemerkenswert sind die schwachen Strömungen in der Weser vor der Geesteeinfahrt. Das ist morphologisch bedingt, da die Geestezufahrt außerhalb des Prallhangs im flacheren Wasser liegt (vgl. Abb. 9).

Die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten werden in der Weser in der dritten Stunde nach T_{nw} erreicht (Abb. 58, Messung 3). Am Fahrwasserrand wurden Geschwindigkeiten von $v_{fmax} > 175 \text{ cm/s}$ gemessen. Das von der See eindringende salzhaltigere Wasser wird aufgrund der höheren Dichte verstärkt im tiefen Wasser stromauf geführt.

In der Geesteeinfahrt prägen sich zunächst in den oberen Wasserschichten gegen den Uhrzeigersinn drehende Flutstromwalzen aus (Messung 3 in Abb. 58). Mit zunehmender Flutstromdauer verlagern sich die Walzenströmungen zum tieferen Wasser (Messung 4 in Abb. 59). Nach Tide-

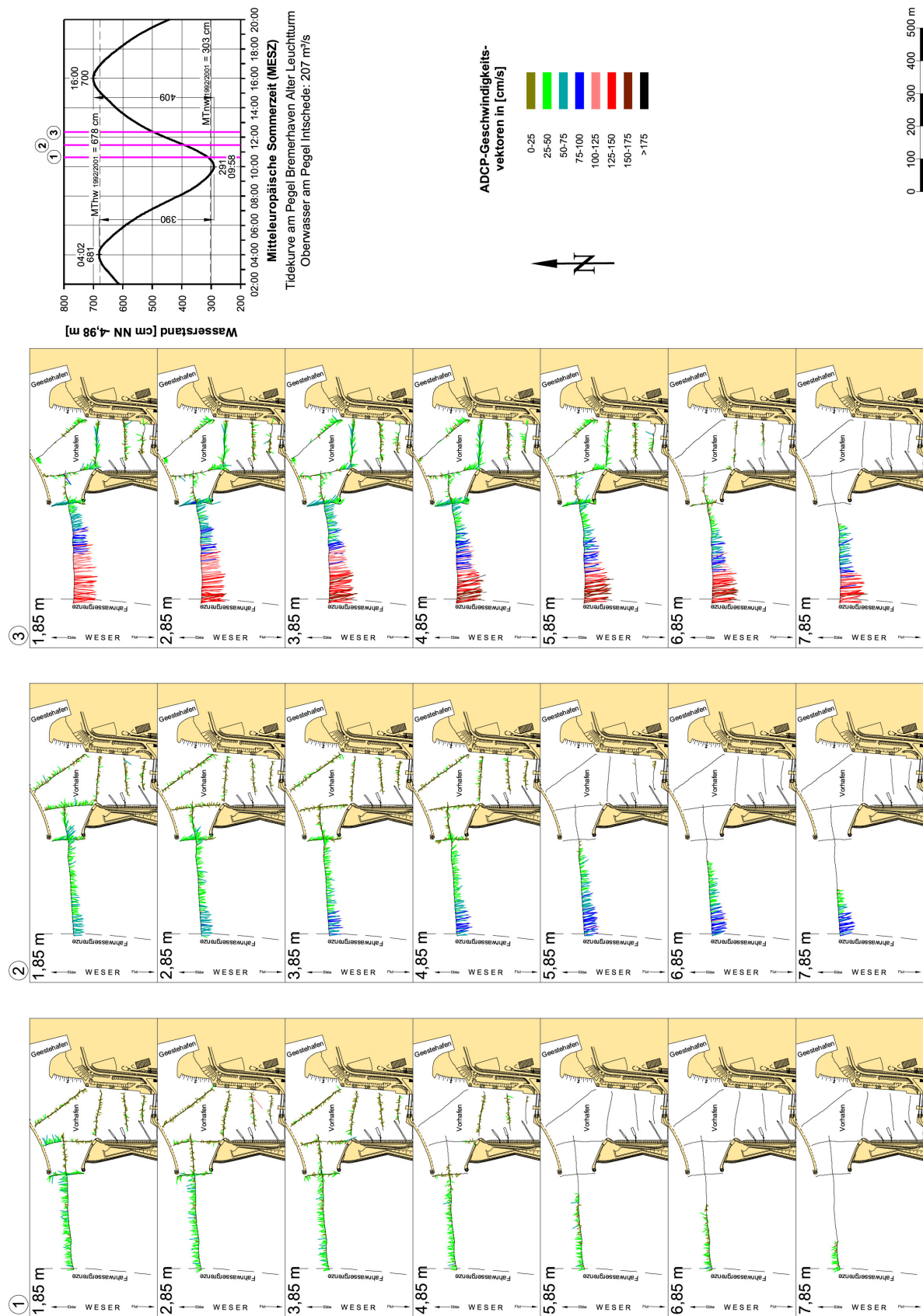


Abb. 58: Strömungen in der Weser im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 28.06.2006, erste Flutphase

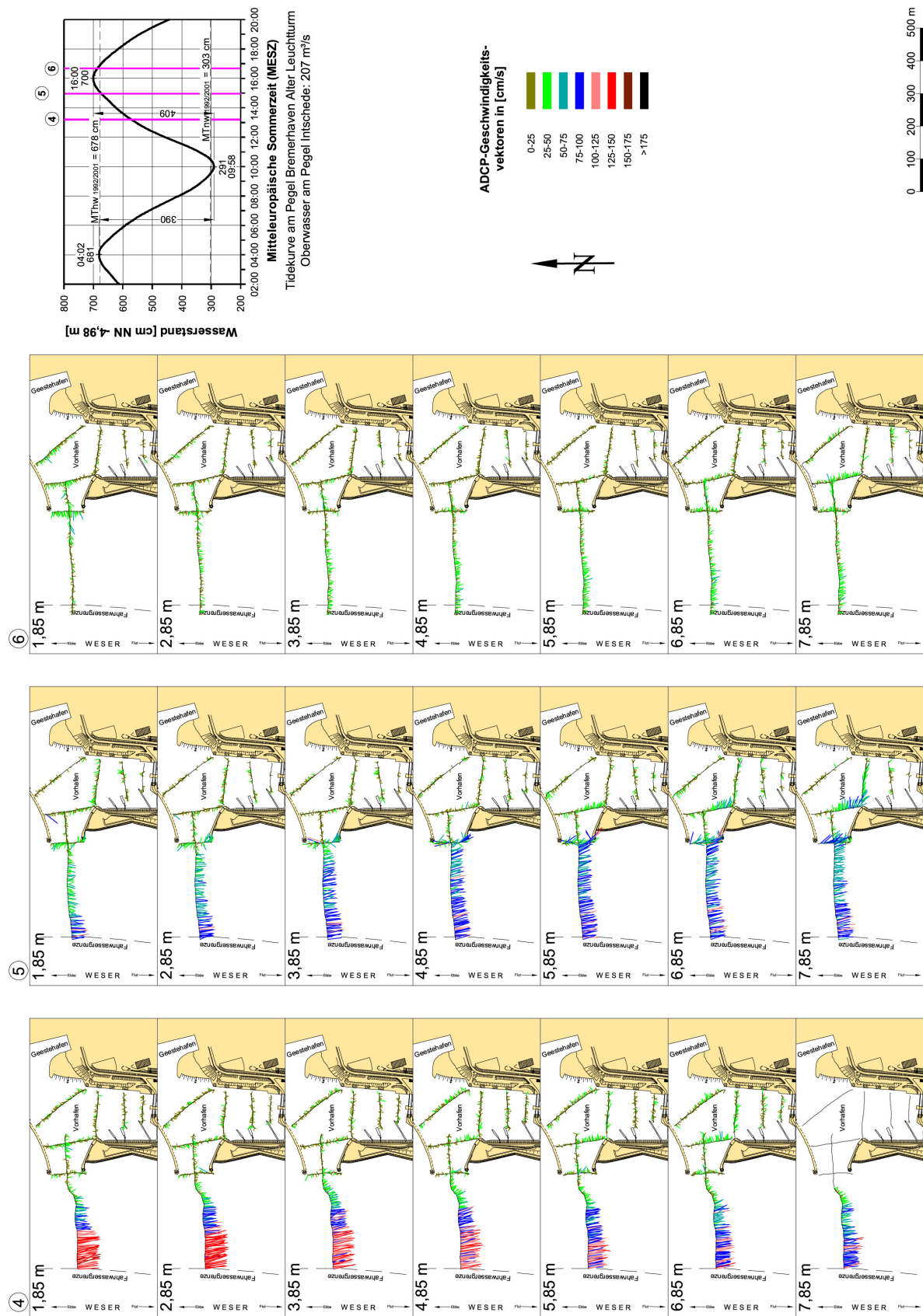


Abb. 59: Strömungen in der Weser im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 28.06.2006, letzte Flutphase

halbwasser stabilisieren sich die linksdrehenden Strömungswalzen. In der späteren Flutstromphase dringen in den tieferen Wasserschichten größere Wassermengen mit stärkerer Intensität in den Vorhafen ein. An der Südmole werden Strömungsgeschwindigkeiten von $v > 50 \text{ cm/s}$ erreicht (Abb. 59, Messung 5). Die sich stärker ausprägenden Dichteeffekte führen dazu, dass Wasser in den oberen Tiefenzellen aus dem Vorhafen zur Weser zurück strömt (Abb. 59, Messung 5).

Die Verhältnisse vom 28. Juni wurden bei vergleichbaren Tide- und Oberwasserbedingungen in ähnlicher Form zwei Tage vorher beobachtet (Abb. 60). In der 6,85 m Tiefenzelle ist die von Dichteströmungen überlagerte Primärwalze in der Geeste und die sich davon ablösende Sekundärwalze im Vorhafen nachvollziehbar. In der oberen Zelle wird der Tideeffekt vom Dichteeffekt (Ausströmung) überlagert.

In der letzten Flutstromphase blieb die gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung zwischen Fahrwassergrenze und Geesteeinfahrt in den tieferen Zellen erhalten. Auch noch bei einsetzender Kenterung in der Weser überlagern sich die Walzen- und Dichteströmungen im Vorhafen. Im tiefen Wasser werden die Flutstromwalzen in der Einfahrt auch noch eine Stunde vor Thw mit $v > 75 \text{ cm/s}$ angefacht und an der Oberfläche strömt das Wasser vom Vorhafen zurück zur Weser (Abb. 59, Messung 5). Erst zur Strömungsumkehr etwa eine Stunde nach Thw sind die Wasserbewegungen in Geeste und Vorhafen deutlich schwächer (Messung 6 in Abb. 59).

• Ebbeströmungen

Am 5. Juli 2006 betrug der Tidefall in Bremerhaven 330 cm und das Oberwasser am Pegel Intschede $Q_o = 149 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die rd. 1 Stunde nach Thw durchgeführte Messung 1 (Abb. 61) zeigt ein ähnliches Strömungsbild wie die letzte Flutmessung in Abb. 59. Die flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen sind auch noch während der Kenterphase zu beobachten. In den oberen Schichten strömt das Wasser zur Weser und weiter unten sind im Mündungsbereich der Geeste die schwächer als bei der Springtide vom 26. Juni ausgebildeten linksdrehenden Flutstromwalzen auszumachen (Abb. 59 und 61).

Etwa 2 Stunden nach Thw (Abb. 61, Messung 2) waren in der ersten Ebbestromphase im Vorhafen nur geringe Wasserbewegungen zu verzeichnen ($v < 25 \text{ m/s}$).

Auch in der folgenden Tidephase mit sich stärker ausprägenden Ebbestromgeschwindigkeiten in der Weser wurden im Schleusenvorhafen nur schwache Strömungsgeschwindigkeiten gemessen (Abb. 61). An der rd. 300 m vom rechten Fahrwasserrand entfernten Geestemündung wurden im flachen Wasser keine rechtsdrehenden Ebbestromwalzen angeregt. Erst gegen Ende der Ebphase konnten in den tieferen Zellen zwischen den Molen dichtebedingte geringe Ausströmungen zur Weser registriert werden (Abb. 62). Ab der 5. Messung waren an der Oberfläche schwache Einströmungen zu beobachten. Zum Eintritt des Thw sind nur sehr geringe Strömungen $v < 25 \text{ cm/s}$ in den Vorhafen (Messung 6, 1,85 m) und in den darunter liegenden Tiefenzellen Wasserbewegungen aus dem Vorhafen auszumachen.

ADCP-Messungen am 26.06.2006

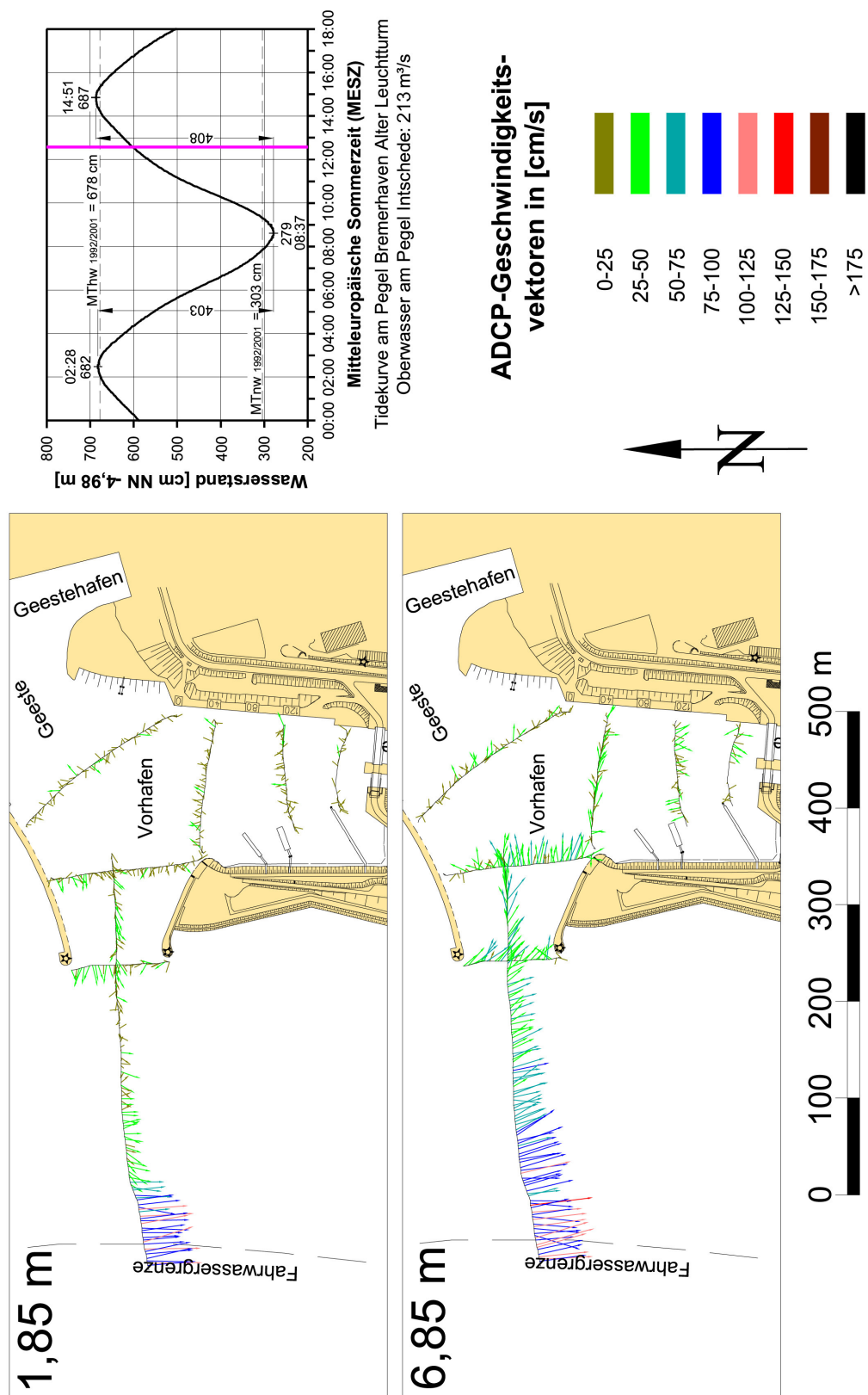
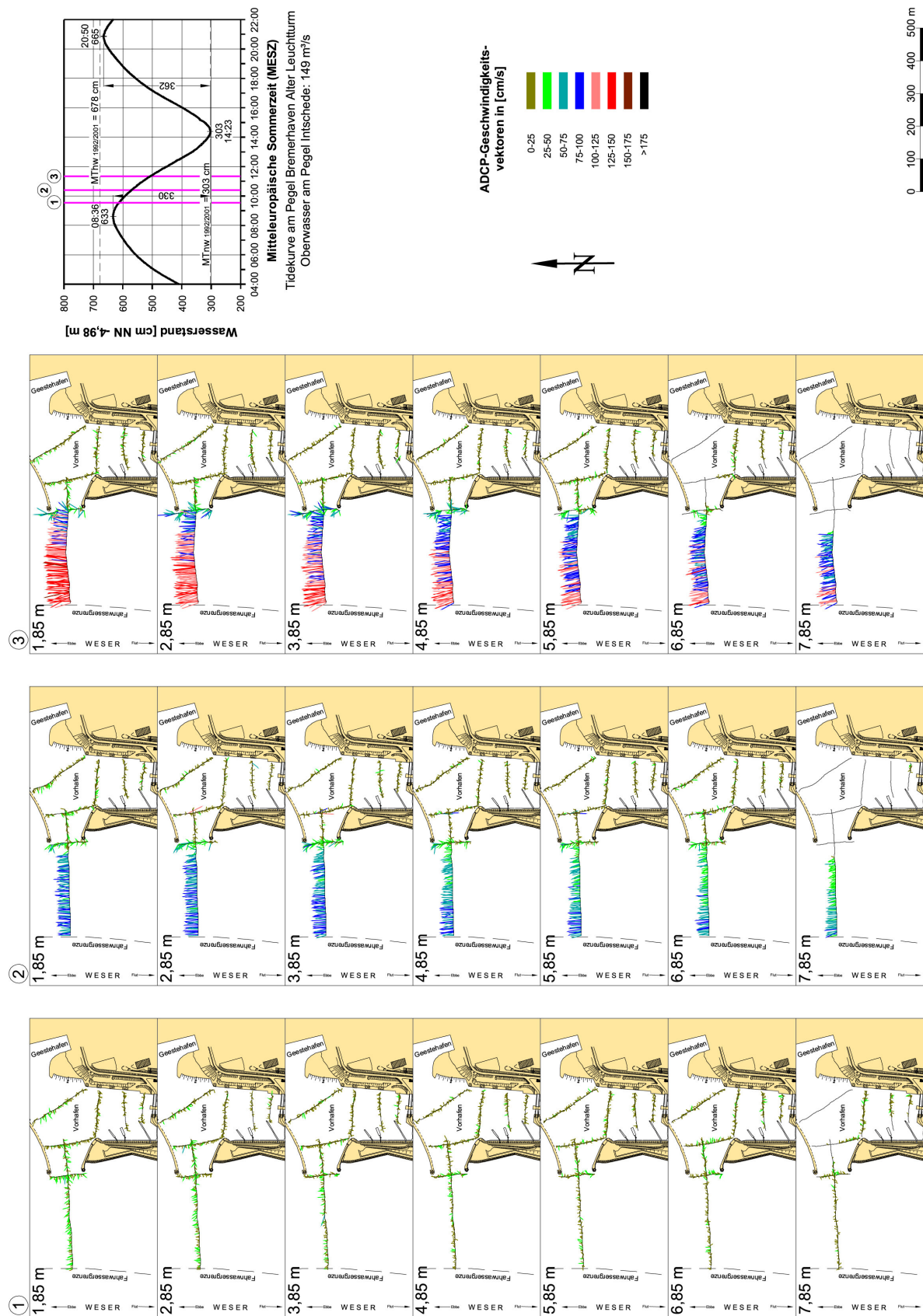


Abb. 60: Überlagerung von Strömungs- und Dichteeffekten im Vorhafen zur Doppelschleuse; ADCP-Messung am 26.06.2006



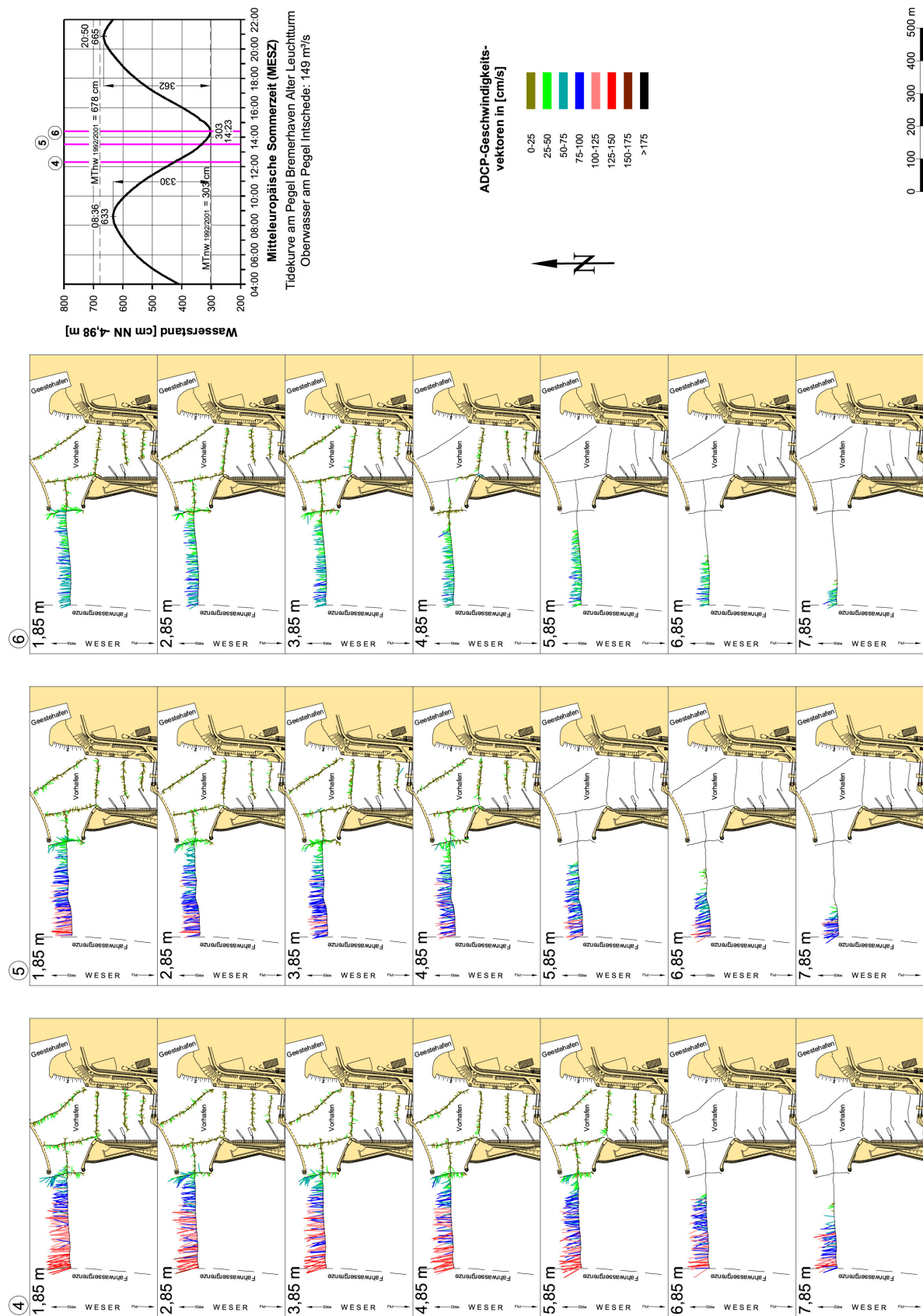


Abb. 62: Strömungen in der Weser im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 05.07.2006, letzte Ebbephase

4.3.2 Salzgehalte

Die in den folgenden zu erläuternden Salzgehaltsmessungen wurden bei relativ geringen Abflüssen aus dem Binnenland durchgeführt. Da das Salzwasser aus der Nordsee in diesem Fall stärker als bei hohem Oberwasser in den Tidestrom eindringt waren entsprechend hohe Salzgehalte zu erwarten.

• Flutstromverhältnisse

Bei einem Springtidehub vom 410 cm und $Q_0 = 217 \text{ m}^3/\text{s}$ lagen am 27. Juni 2006 (Abb. 63) ähnliche Randbedingungen vor wie bei den Strömungsmessungen vom folgenden Tag (vgl. Abb. 58 und 59). Wie bei den unterhalb gelegenen nördlichen Hafenzufahrten betragen die tideabhängigen, periodischen Schwankungen des Salzgehaltes in der Weser $\Delta S = S_{Kf} - S_{Ke} > 10 \text{ ‰}$. Auch im Vorhafen der Doppelschleuse sind die Salzkonzentrationen zu denen im Strom phasenverschoben. Bei Tideniedrigwasser ist der Salzgehalt im Weserwasser geringer als in der Geeste und vor den Schleusen (Messung 1 in Abb. 63). Bei Thw ist es umgekehrt.

Ab der zweiten Stunde nach Thw kehrt sich das Dichtegefälle zwischen Weser und Vorhafen um (Messung 2 und 3 in Abb. 63). Etwa ab $T_{\frac{1}{2}}^w$ bildet sich ein starkes horizontales Gefälle von Position 6 (Weser) zu den Positionen 3 (Geestehafen) und 1 (Außenhaupt) aus. Auffällig ist dabei auch der sich verstärkende Vertikalgradient bei den Positionen 1 bis 5 mit fortschreitender Flutstromdauer (Messung 3 bis 6). Die Salzgehaltsunterschiede betragen in der späteren Flutstromphase $\Delta S > 5 \text{ ‰}$ und max. $\Delta S \approx 9 \text{ ‰}$ an der Geesteeinfahrt. Bemerkenswert sind auch die deutlich höheren Konzentrationen an der Südmole (Staupunkt, Pos. 4 in Abb. 63) gegenüber Pos. 5 (Ablösungszone). Die vertikalen und horizontalen Salzgradienten erklären die ab $T_{\frac{1}{2}}^w$ sich zunehmend verstärkenden sohlennahen Einstömungen entlang der Südmole (vgl. Abb. 59). In den unteren Tiefenzellen wurden die flutorientierten Dichteströmungen bis nach Thw aufrecht erhalten. Das erklärt sich mit den in Abb. 63 aufgetragenen Salzgehaltsverhältnissen während der Flutstromphase.

• Ebbestromverhältnisse

Bei der Nipptide vom 06.06.2006 betrug der Abfluss am Pegel Intschede lediglich $Q_0 = 144 \text{ m}^3/\text{s}$. Das ist der Grund für die relativ hohen Salzkonzentrationen in Abb. 64.

Die nach Thw durchgeführte 1. Messung am 6. Juli entsprechen den zur gleichen Tidephase ermittelten Salzgehalten bei der Springtide vom 27. Juni (Messungen 5 in Abb. 63). Die Umkehrung der horizontalen Gradienten der Salzkonzentrationen zwischen Weser und Vorhafen vollzieht sich während der Ebbestromphase wegen der geringen Wasserbewegungen deutlich später als bei Flutströmung. Sie war erst knapp 2 Stunden vor Eintritt des Thw abgeschlossen (Messung 4 in Abb. 64). Anschließend gleichen sich die Salzgehalte in der Geeste und dem Vorhafen bei abnehmender Konzentration denen in der Weser an. Die Vertikalgradienten sind dabei im flacheren Wasser während der niedrigen Wasserstände deutlich schwächer als bei Tidehochwasser (vgl. auch Abb. 63). Das ist einer der Gründe für die schwachen, ebbestromorientierten Dichteströmungen im Vorhafen.

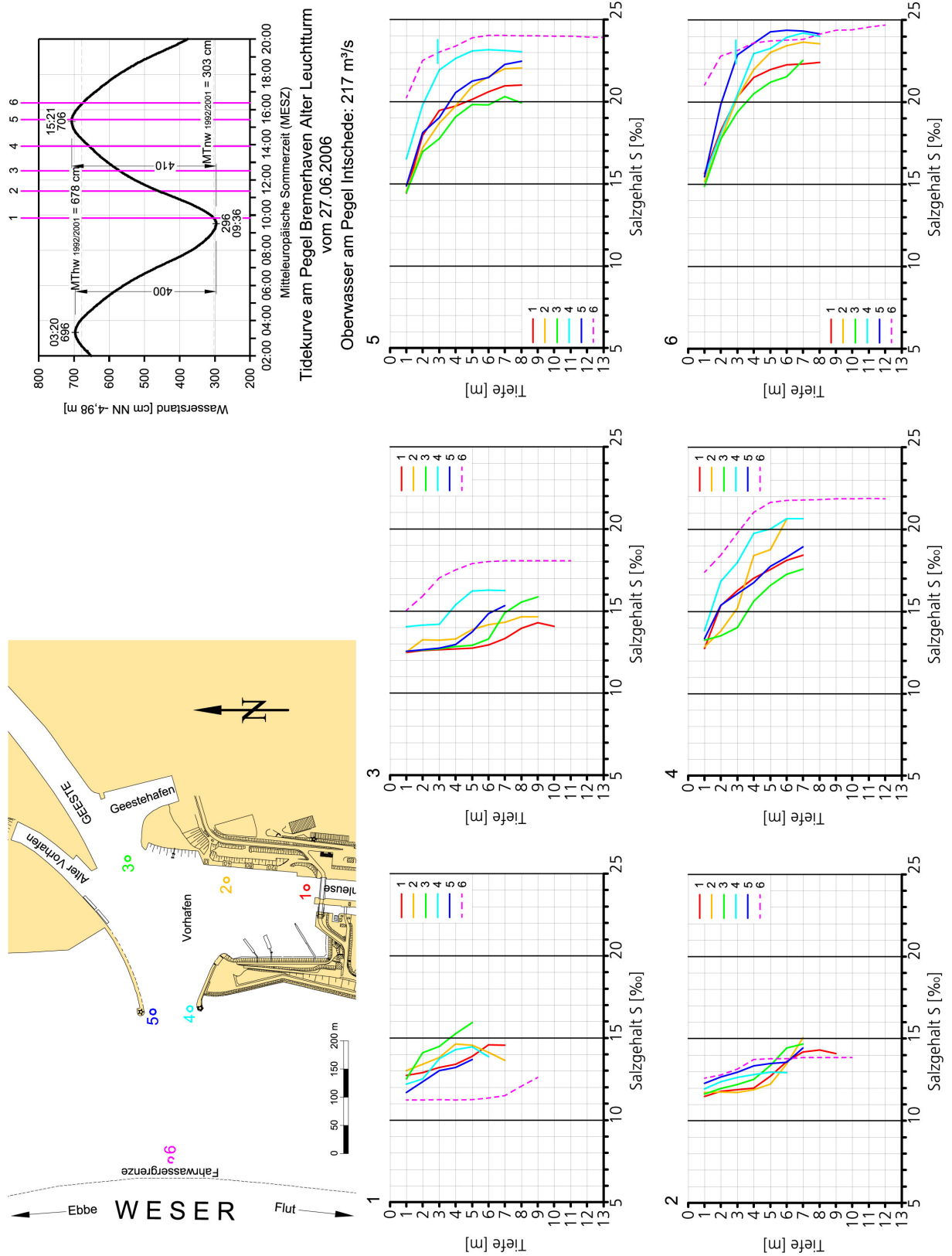
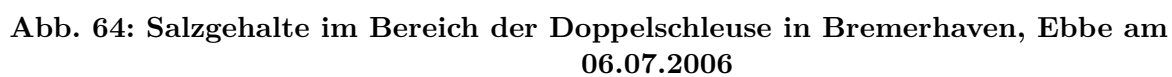
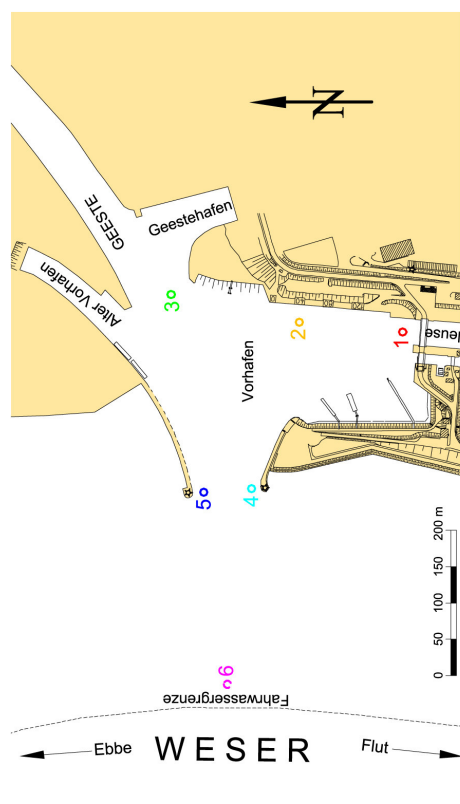


Abb. 63: Salzgehalte im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, Flut am 27.06.2006



4.3.3 Schwebstoffe

- **Flutstromverhältnisse**

Während der Ebbestromkenterung am Vormittag des 27. Juni 2006 betrug der Schwebstoffgehalt am rechten Fahrwasserrand (Pos. 6) lediglich $C_s < 150 \text{ mg/l}$ (Messung 1 in Abb. 65). Im Vorhafen selbst wurden etwas höhere Konzentrationen bis zu $C_s \approx 250 \text{ mg/l}$ ermittelt. Die bei der 4. Messung aufgenommene sprunghafte Zunahme der Schwebstoffgehalte kennzeichnet in 7 m Tiefe bei Position 1 und 3 den hochfrequenten Echolothorizont. Er kann als Übergang zum Flüssigschlick definiert werden.

Mit einsetzender Flut, in der zweiten Stunde nach Tnw, ist ein kontinuierlicher Anstieg der Schwebstofffracht in der Weser mit Abb. 65 (Messung 2 bis 6) nachvollziehbar. Die vertikale Verteilung der Schwebstoffe entspricht dabei dem Salzgradienten und daraus abzuleitenden Strömungsprofil. Die stärkeren Suspensionstransporte finden bei den höheren Strömungsgeschwindigkeiten und Salzkonzentrationen in den unteren Wasserschichten statt.

Die größten Schwebstofffrachten treten im Vorhafen bei Thw und danach ein. Am Fahrwasser waren es am 27. Juni 2006 bis etwa 800 mg/l (Messung 5 und 6, Abb. 65). Besonders auffällig sind übrigens für alle Messungen und Positionen die ähnlichen Gradienten der Schwebstoff- und Salzgehaltsprofile (vgl. Abb. 63 und 65).

- **Ebbestromverhältnisse**

Die ersten beiden Messungen vom 6. Juli 2006 entsprechen im Verlauf den zur gleichen Tidephase ermittelten Schwebstoffkonzentrationen der Flutmessung vom 27. Juni 2006 (Abb. 66, 1 sowie Abb. 65, 5 und 6). Die Konzentrationen waren Anfang Juli etwas höher.

Die relativ hohen Feststoffkonzentrationen im Vorhafen während der gesamten Ebbedauer sind auch darauf zurückzuführen, dass die natürlichen Verhältnisse nicht allein durch den Fährverkehr beeinflusst worden sind. Zusätzlich hat während der Messungen ein lebhafter Schleusenbetrieb stattgefunden.

Bemerkenswert ist der Umstand, dass in der fortgeschrittenen Ebbestromphase (ab Messung 4 in Abb. 66) im Vorhafen (Positionen 1 bis 3) höheren Feststoffe ermittelt wurden als in der Einfahrt und der angrenzenden Weser. Das mit der Flut in den Vorhafen eingetragene Material wird aufgrund der schwächeren Strömungseffekte während der Ebbestromphase nicht wieder ausgeräumt, was zur positiven Feststoffbilanz führt.

Im übrigen ist die Ähnlichkeit der Salzgehalts- und Schwebstoffgradienten auch während der Ebbephase bemerkenswert (vgl. Abb. 64 und 66). Das ist auf die vergleichsweise geringen Wasserbewegungen in der Geesteeinfahrt und den Schleusenvorhafen zurückzuführen. Aufgrund der deutlich turbulenteren Strömungsvorgänge in den Vorhäfen der Nord- und Kaiserschleuse wurden dort bedeutend stärkere Durchmischungsvorgänge, besonders während der Flutstromphase, beobachtet.

Die Zusammenhänge zwischen Strömungsgeschehen, den tideabhängigen Salzgehalten und Schwebstoffkonzentrationen sind für den Vorhafen zur Fischereihafenschleuse auch für die Eb-

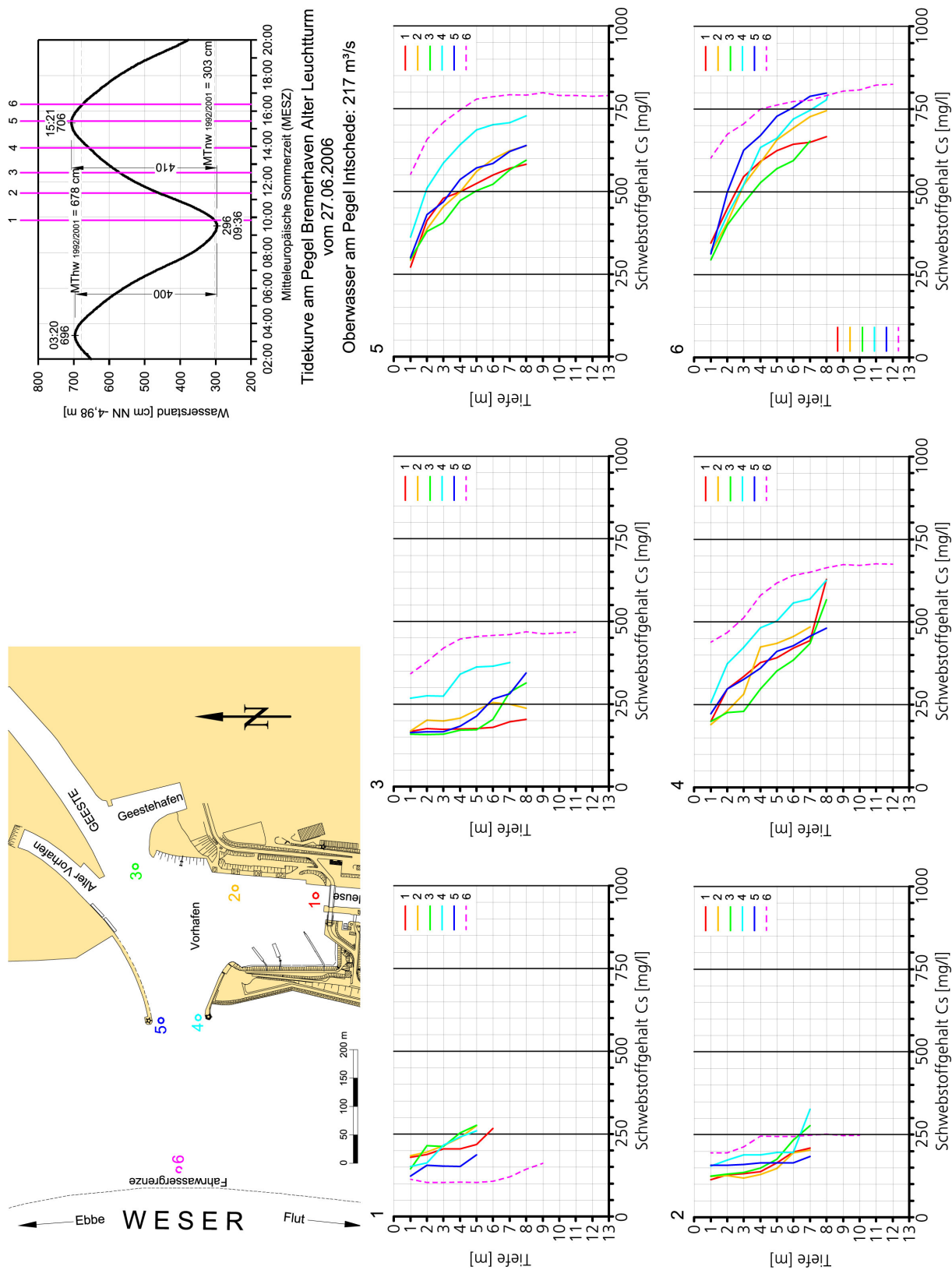


Abb. 65: Schwebstoffe im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, Flut am 27.06.2006

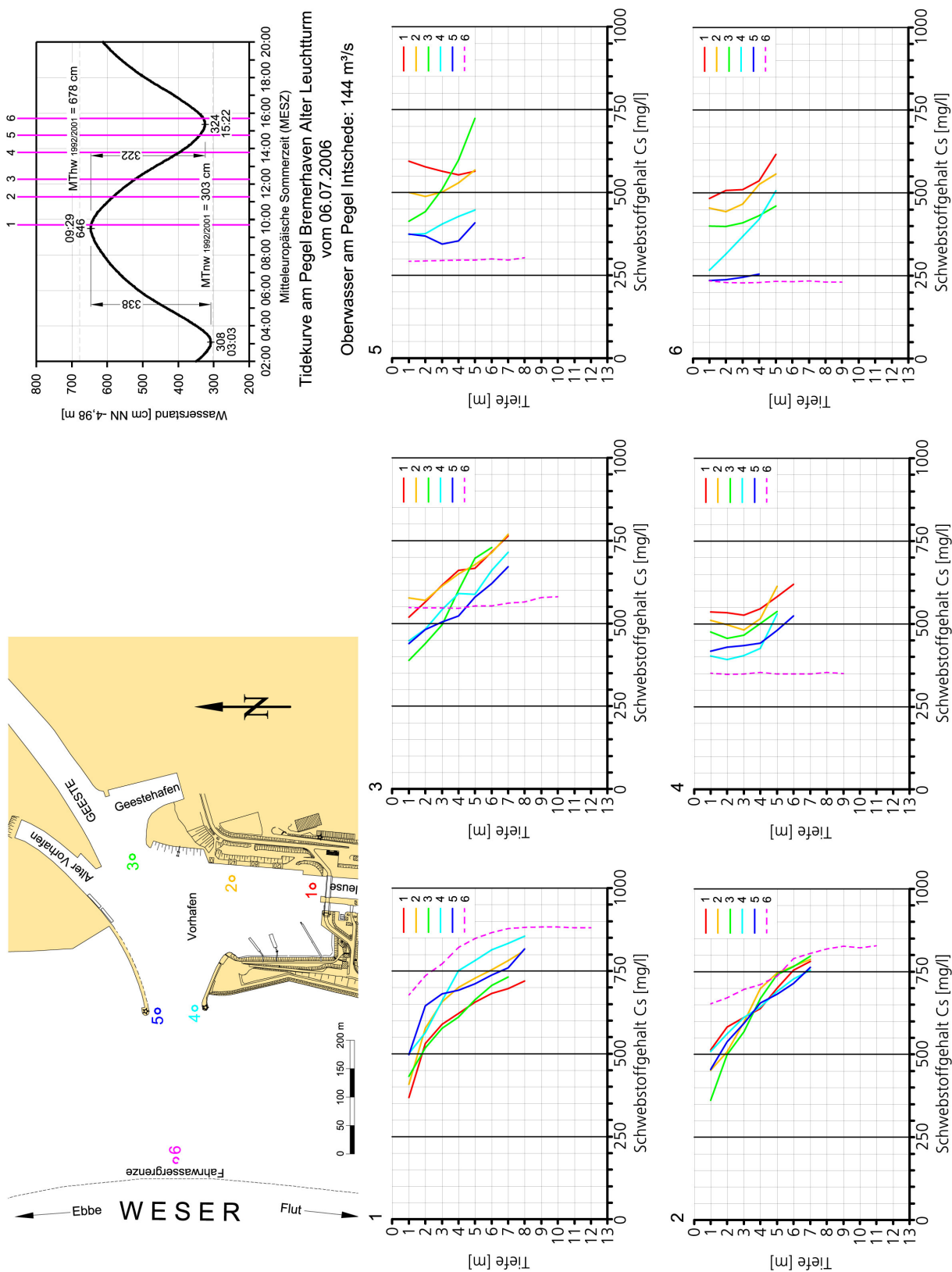


Abb. 66: Schwebstoffe im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, Ebbe am 06.07.2006

bephase gut erkennbar. Das geht aus dem gleichartigen Verlauf der Salzgehalts- und Schwebstoffverteilungen hervor.

5 Messungen in Emden

Die oberhalb von Emspier und Emskai gelegene Hafenzufahrt in Emden ist in Abb. 67 dargestellt. Wie die Vorhäfen in Bremerhaven liegen der Emder Vor- und Außenhafen am rechten Emsufer. Im Gegensatz zur Nord- und Kaiserschleuse ist die Hafeneinfahrt in Emden zur Flutströmung ausgerichtet.

Morphologisch interessant sind die Verhältnisse vor der Hafenzufahrt im Verschwenkungsbereich des Fahrwassers. Der Talweg weicht dort nach Süden aus und befindet sich im anschließenden flacheren Stromabschnitt am südlichen Fahrwasserrand. Bemerkenswert sind auch die geringeren Sohl-tiefen vor dem Staupunkt der Flutströmungen an der Ostmole des Vorhafens. Die mit der ADCP-Sonde gefahrenen Querprofile in der Ems und Vorhafeneinfahrt sind der Abb. 67 zu entnehmen.

5.1 Strömungen in der Ems

- **Flutströmungen**

Am 25. Mai 2005 betrug der Springtidehub am Pegel Emden Neue Seeschleuse 380 cm bei einem Oberwasserabfluss am Pegel Versen von $Q_o = 44,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Binnenabfluss lag damit deutlich unter dem langjährigen Mittelwert von $MQ_{o1941/2004} = 80,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Während der Kenterphase (Messung 1 und 2 in Abb. 68) herrschte südwestlicher Wind von 4 Bft (6 bis 8 m/s) mit abnehmender Tendenz im Verlauf der Messungen. Mit den ersten Messungen werden die ebbestromorientierten Dichteströmungen in Abb. 68 dokumentiert. In den oberen Zellen strömt das Wasser in den Vor- und Außenhafen und in den tieferen Wasserschichten zurück in die Ems. Mit dem einsetzenden Flutstrom in der Ems findet der Füllvorgang dichtebedingt noch über die Walzenströmungen an der Oberfläche statt. Das führt zur verstärkten Ausströmung des salzhaltigeren Wassers in den tieferen Schichten (Messung 3).

Wie in der Weser erreichen die Strömungsgeschwindigkeiten in der Tideems in der ersten Flutstromphase die größten Werte (Messung 4 und 5 in Abb. 69). Im Bereich der Hafenzufahrt werden die Strömungen, den morphologischen Randbedingungen entsprechend, nach Süden umgelenkt und im flacher werdenden Wasser beschleunigt. Etwa ab $T_{\frac{1}{2}w}$ bilden sich die flutstromorientierten Dichte- und Walzenströmungen aus. Das Profil in der Hafeneinfahrt zeigt wie bei der 5. Messung das Wasser in den oberen Schichten zur Ems strömt. In den tieferen Zellen ist die an der Ostmole einströmende, linksdrehende Flutstromwalze auszumachen.

Die aus den ADCP-Messungen ermittelten Vertikalprofile in Abb. 70 dokumentieren die brackwasserbedingten Besonderheiten von der Ebbestromkenterung bis zu den sich rasch ausprägenden, starken Flutströmungen im sohlennahen Bereich. Nur etwa eine Stunde nach der Strömungsumkehr (2 Stunden nach T_{nw}) wurden vor der Einfahrt in den Profilen 2 und 3 zwei



Abb. 67: Lageplan des Emder Hafens mit Peilung vom März 2005 (WSD Northwest und NHA Emden)

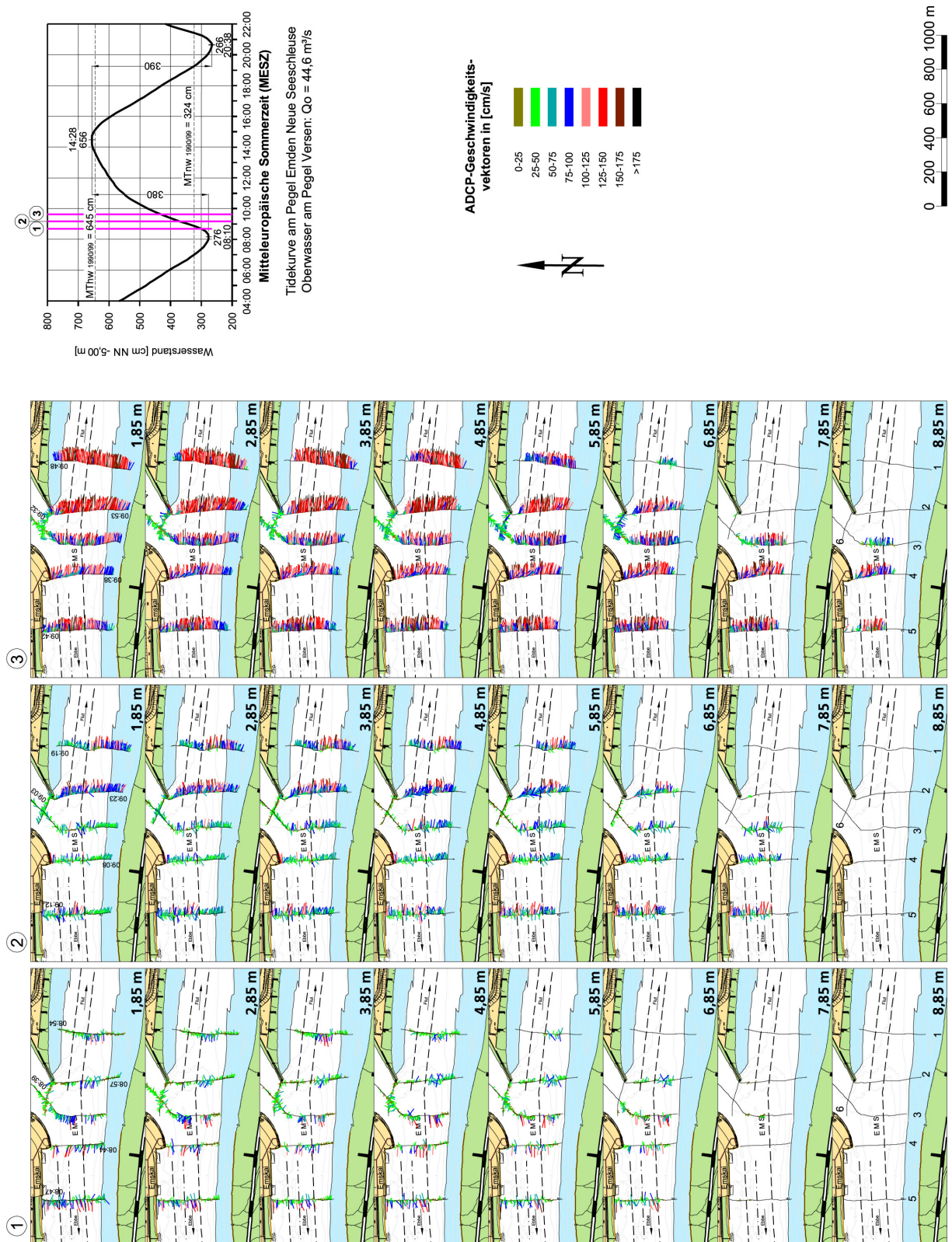


Abb. 68: Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 25.05.2005, 1. Flutphase

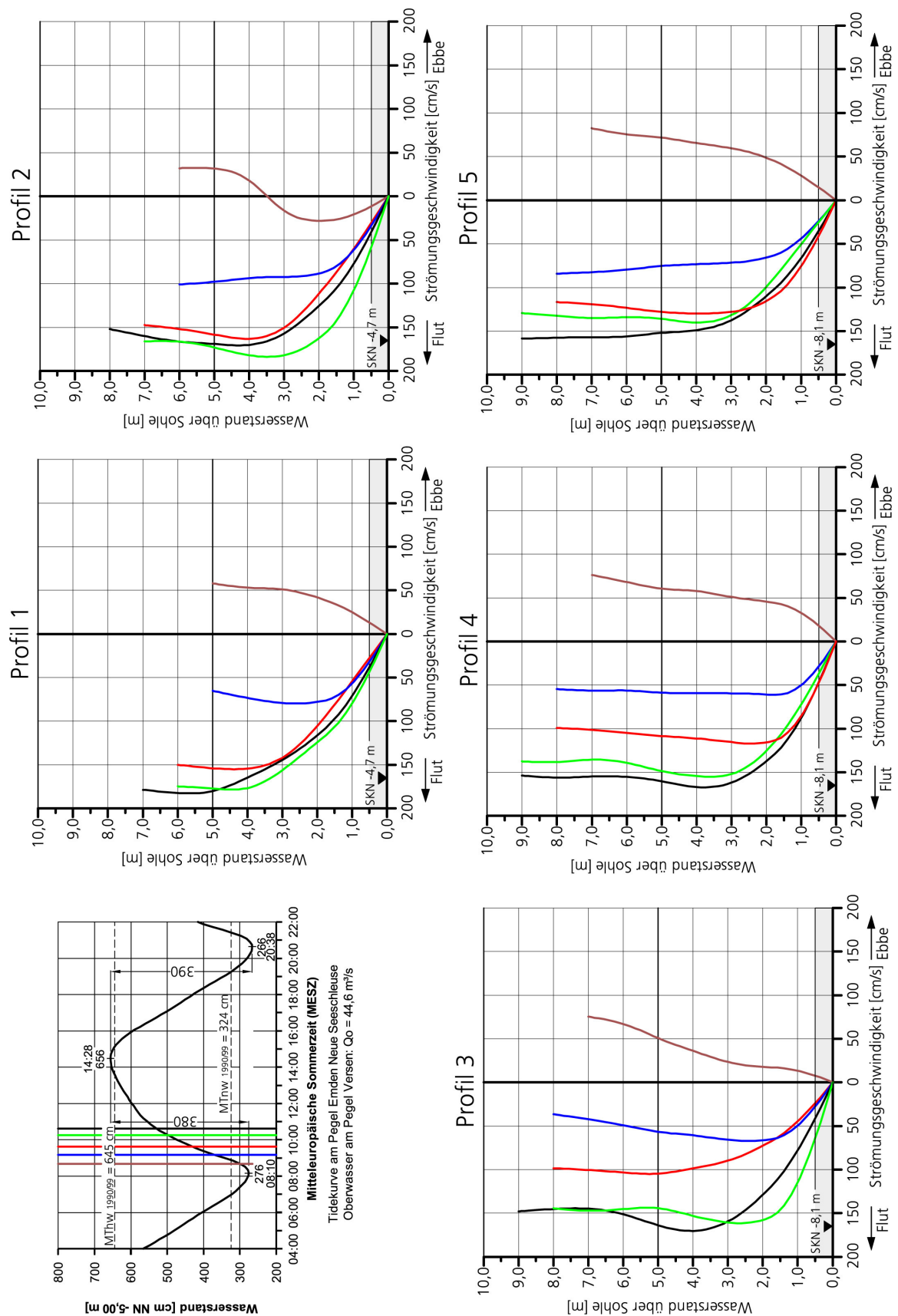


Abb. 70: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Ems am 25.05.2005

Meter über der Flusssohle bereits mittlere Flutstromgeschwindigkeiten von $v_f > 150$ cm/s gemessen (grüne Linien in Abb. 70). Die maximalen Geschwindigkeiten traten in den unteren Wasserschichten auf. Wie im Weserästuar verstärkt auch in der Ems das von See kommende Salzwasser die Sohlströmungen.

Die etwas andere Geschwindigkeitsverteilung im oberen Profil 1 ist auf die Lage im rd. 3 m flacheren Wasser zurückzuführen. Bei dem unteren Profil 5 wirken sich die Querschnittsaufweitungen durch die Liegewannen am Emskai und der Emspier auf die Strömungsverteilungen und -geschwindigkeiten aus.

Mit zunehmender Flutstromdauer und sich abflachender Tidekurve nimmt die Strömungsintensität in der Ems kontinuierlich ab (Abb. 71). Gleichzeitig stabilisieren sich die Austauschvorgänge zwischen dem Tidestrom und den Hafenzufahrten. Mit den ADCP-Profilen im Einfahrtsbereich wird das in Abb. 71 gezeigt.

Die letzte Flutstromphase bis zur Kenterung ist in Abb. 72 aufgetragen. Die Austauschvorgänge wirken sich bis zur Strömungsumkehr in den Profilen 2 bis 4 aus. Das zeigt sich an den Maximalwerten in den unteren und den Minderungen der Geschwindigkeiten in den oberen Schichten. Beim vorletzten Umlauf (Messung 11) strömte das Wasser vor dem westlichen Einfahrtsbereich an der Oberfläche bereits in Ebberichtung. Die Kenterung setzte sich von oben nach unten durch. Die Vertikalprofile in Abb. 73 zeigen die langsam abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten in der fortgeschrittenen Flutstromphase bis zur Strömungsumkehr. Der mehr parabolische Verlauf im Profil 1 ist auf den Sohlensprung zurückzuführen. Im unteren Profil 5 sind die Geschwindigkeiten gleichmäßiger über die Tiefe verteilt. Die Profile 2 bis 4 im Bereich der Einfahrt werden von den Austauschvorgängen beeinflusst. Die in den oberen Wasserschichten zur Ems zurückströmenden Wassermassen schwächen die Strömungen bis ins Fahrwasser. Die maximalen Flutströmungen sind im unteren Wasserkörper anzutreffen. Von dort gelangt das salzhaltigere Wasser über die linksdrehenden Walzen in den Vor- und Außenhafen.

• Ebbeströmungen

Die Ebbemessung am 1. Juni 2005 wurde bei etwa mittleren Tideverhältnissen und leichtem Wind aus nordwestlicher Richtung mit 4 m/s (Bft 3) durchgeführt.

Die erste Messung wurde während der Flutstromkenterung vorgenommen Abb. 74. Im Einfahrtsbereich werden die Strömungsvorgänge noch durch die flutstromorientierten Dichte- und Strömungseffekte beeinflusst. Etwa 3 Stunden nach Tidehochwasser (rd. 2 Stunden nach Strömungsumkehr) hatten sich die Ebbeströmungen in der Ems voll ausgeprägt (Messung 5 und 6 in Abb. 75).

Auch die Verteilung der Ebbeströmungen folgt den morphologischen Gegebenheiten in der Ems. Von Profil 1 bis 5 verlagern sich die maximalen Strömungen mehr zum nördlichen, rechten Emsufer. Außerdem ist mit den Auftragungen der ADCP-Geschwindigkeitsvektoren nachzuvollziehen, dass die stärksten Strömungen an der Oberfläche zu verzeichnen sind. In den unteren Bereichen der Brackwasserzonen der norddeutschen Tideflüsse werden die Sohlströmungen während der Ebbestromphasen geschwächt und bei Flutstrom verstärkt, was den resultierend stromauf

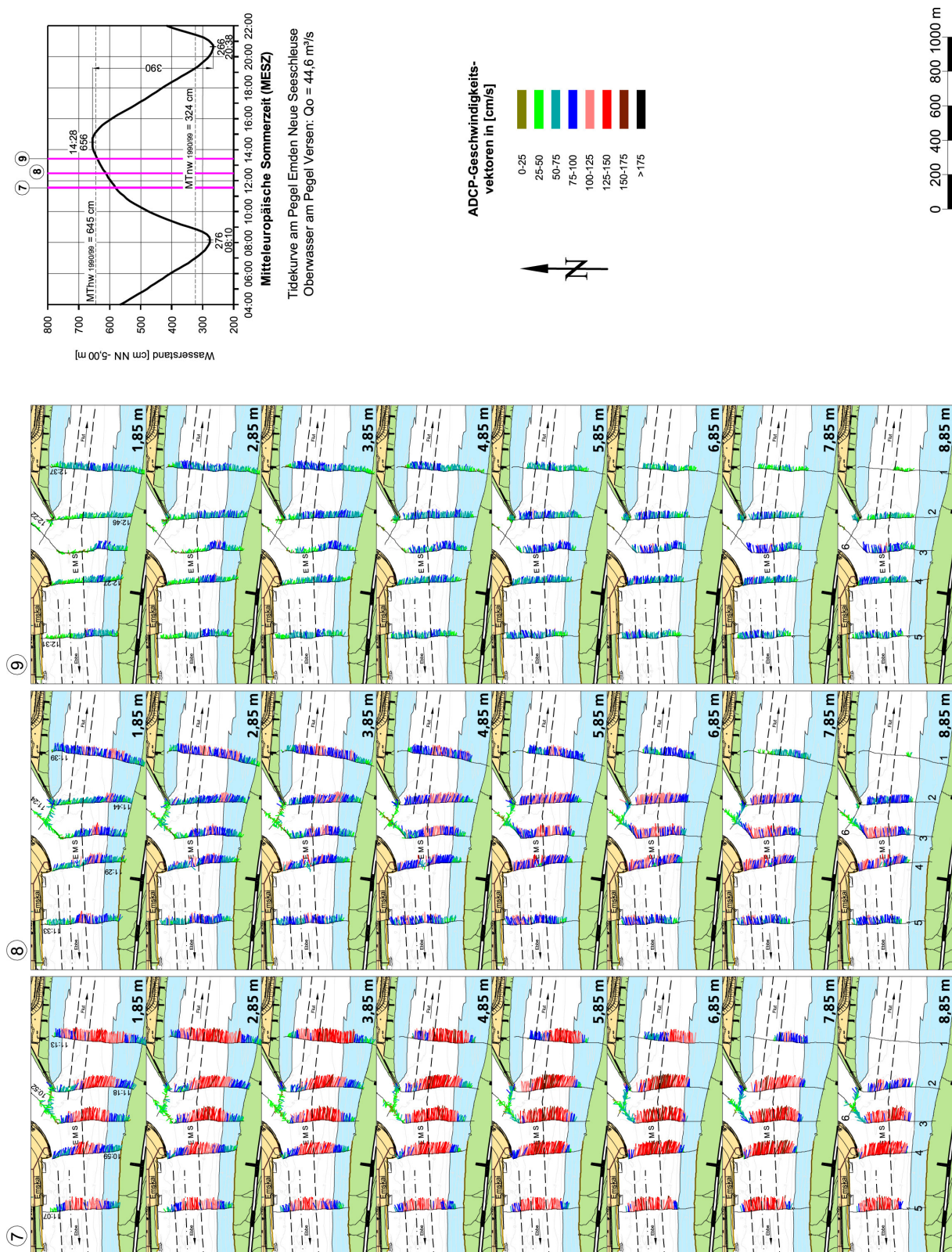


Abb. 71: Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 25.05.2005, 3. Flutphase

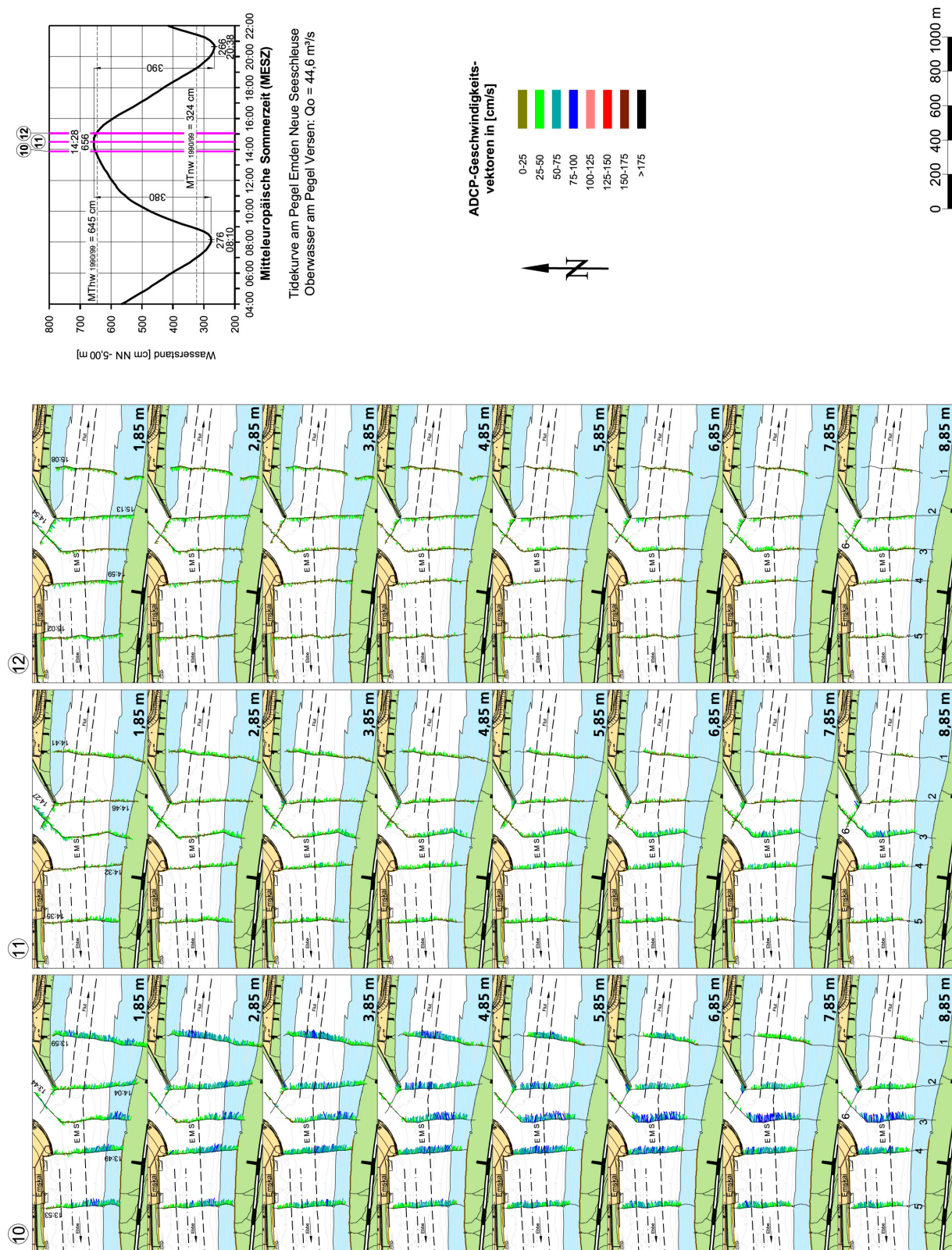


Abb. 72: Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 25.05.2005, 4. Flutphase

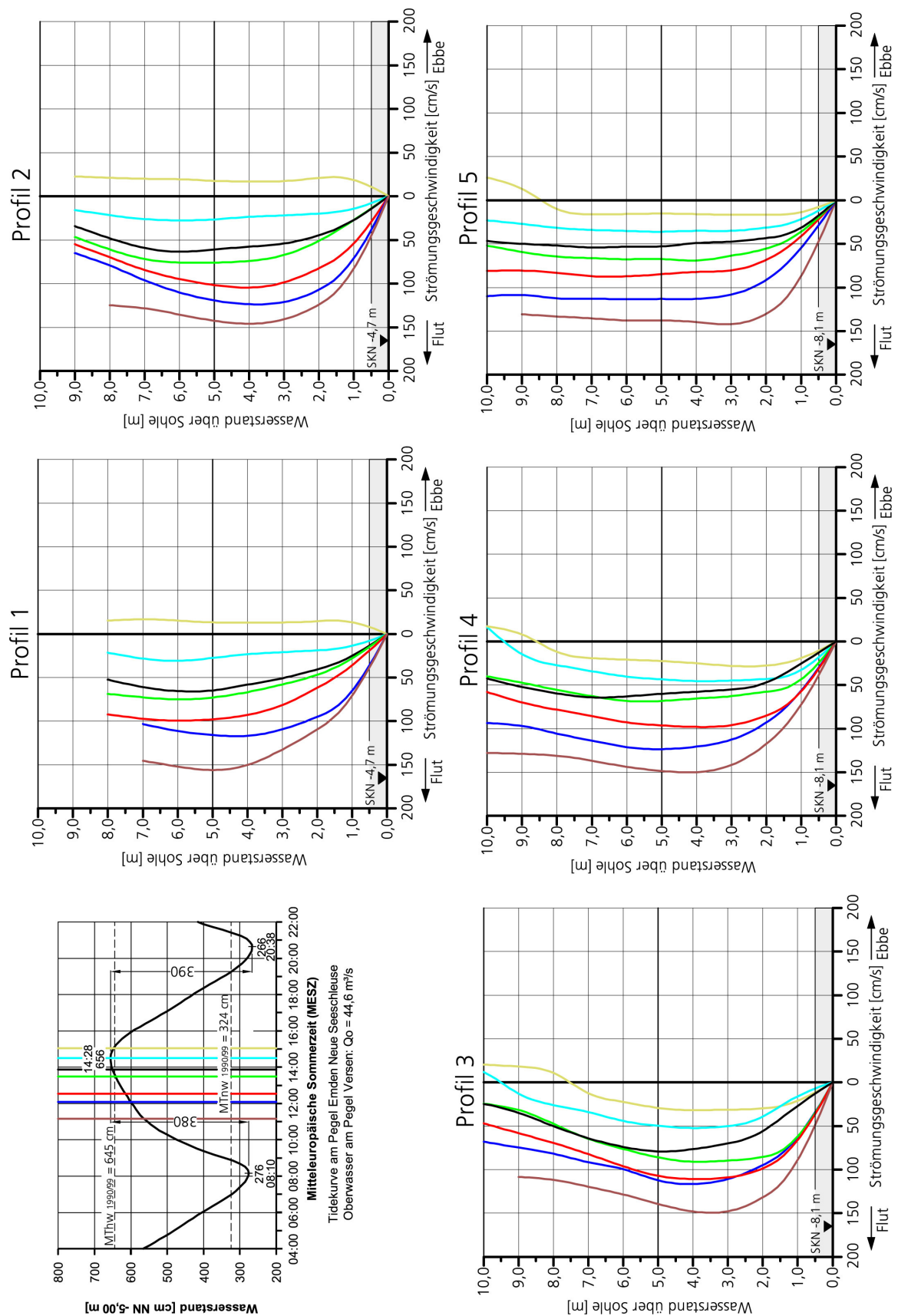


Abb. 73: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Ems am 25.05.2005

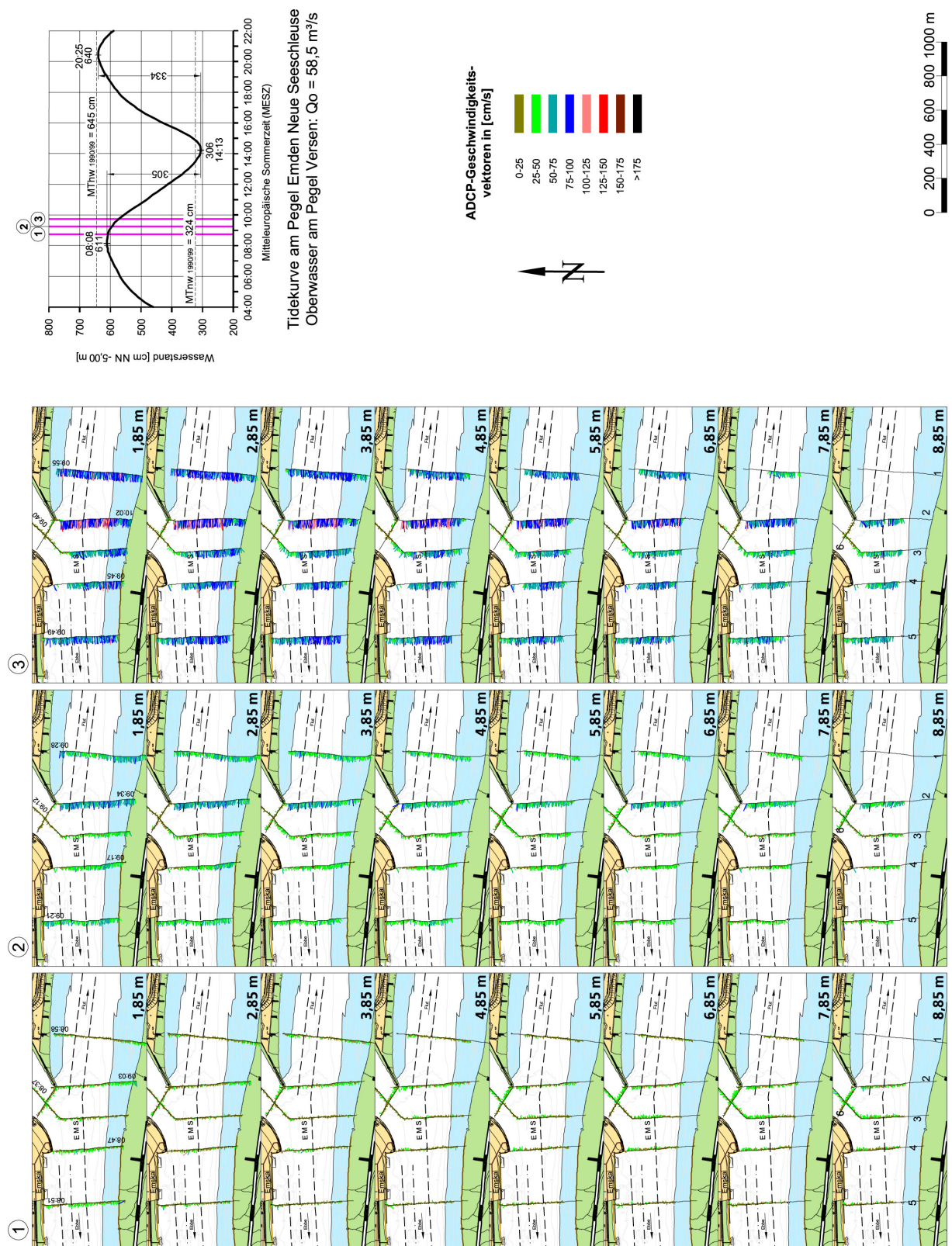


Abb. 74: Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 01.06.2005, 1. Ebbephase

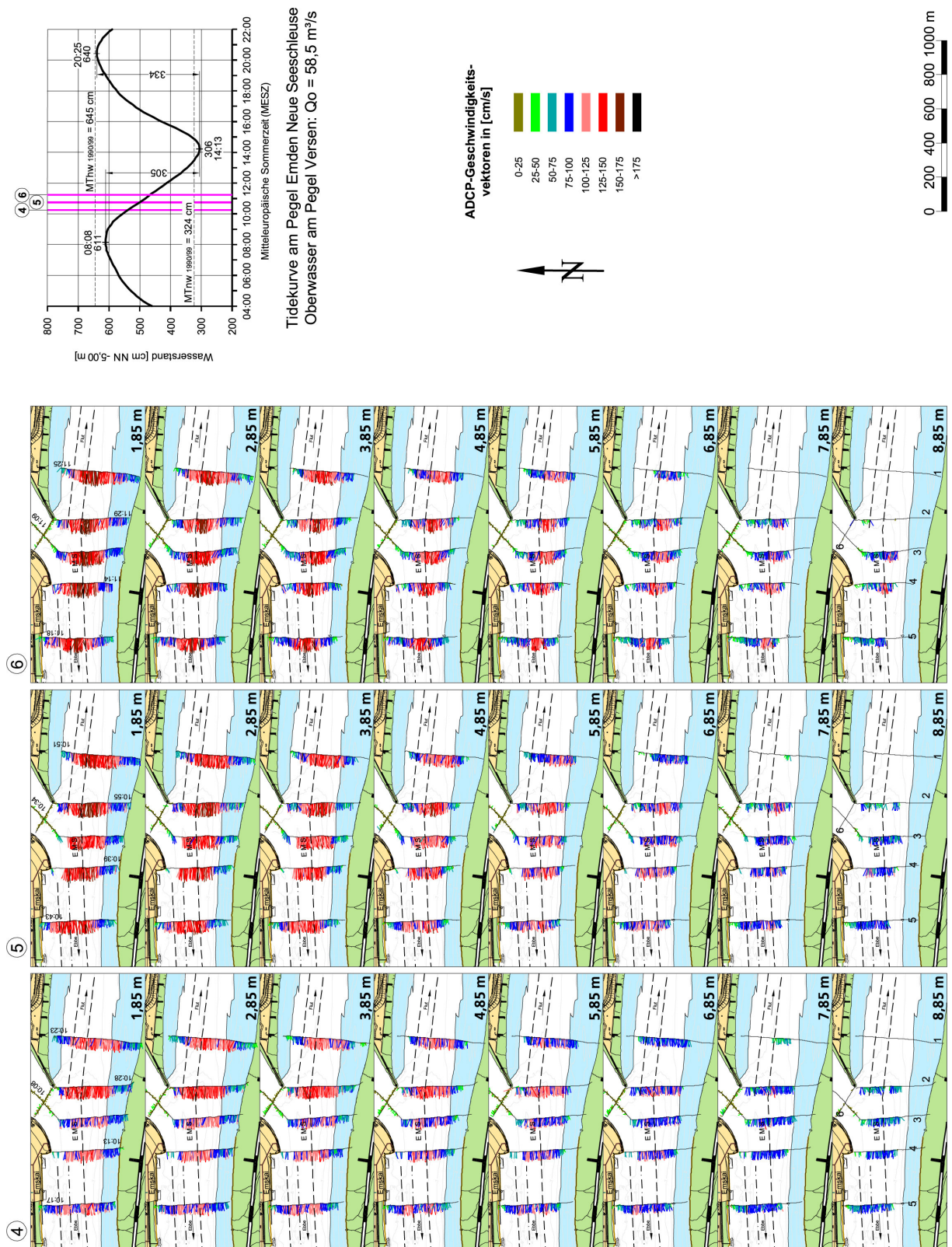


Abb. 75: Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 01.06.2005, 2. Ebbephase

gerichteten Geschiebetransport verursacht.

Die in Abb. 76 aufgetragenen Vertikalprofile zeigen, wie sich die Ebbwassermengen bei der Flutstromkenterung von oben nach unten durchsetzen. In den folgenden beiden Stunden bauen sich dann die im Brackwasserbereich typischen vertikalen Strömungsprofile auf. Interessant ist ein Vergleich mit den deutlich höheren Geschwindigkeiten im sohlennahen Bereich während der Flutstromphase (Abb. 70 und 73).

Die gegenüber der Flut- gleichmäßiger verteilten Strömungen während der Ebbestromphase wird mit Abb. 77 belegt. Erst in der letzten Stunde vor Tideniedrigwasser wurden die Ebbeströmungen deutlich schwächer (Abb. 78 und 79). Die Kenterung trat während der letzten Messung (12) etwa 1 Stunde nach Tideniedrigwasser, von der Flusssohle ausgehend, ein.

5.2 Salzgehalte

Die Salzgehalte im äußeren Vor- und Außenhafen und der Ems wurden jeweils einen Tag nach den Flut- und Ebbestrommessungen bei vergleichbaren Tide- und Oberwasserverhältnissen durchgeführt.

• Flutstromverhältnisse

Am 26. Mai 2005 betrug der Springtidehub am Pegel Neue Seeschleuse $Thb = 385$ cm bei niedrigem Oberwasser in Versen mit $Q_0 = 43,2$ m³/s Abb. 80.

Bemerkenswert sind die starken Vertikalgradienten der Salzgehalte mit bis zu $\Delta S \approx 8$ ‰ während der ersten Messung nach Tideniedrigwasser. Kennzeichnend ist auch das horizontale Salzgehaltsgefälle in der Einfahrt zwischen Pos. 2 und 3 bis ≈ 5 ‰ in den oberen Wasserschichten. Mit dem Ebbestrom wird dort bekanntlich die im Uhrzeigersinn drehende Strömungswalze angeregt. Die Ebbwassermengen werden an der Ostmole (Ablösezone) vorbei zum Staupunkt (Pos. 3) an der Westmole transportiert.

Es ist auch aus Abb. 80 zu entnehmen, wie mit den Ebbeströmungen das spezifisch leichtere Wasser an der Oberfläche in den Hafen und das salzigere Wasser in den tieferen Schichten aus dem Hafen strömt. Diese ebbestromorientierten Dichteströmungen dauern bis nach der Strömungsumkehr an. Bis zur 2. Messung, etwa zwei Stunden nach Tideniedrigwasser wurden immer noch in der Ems die geringsten Salzgehalte, bei sich abschwächenden Vertikalgradienten, registriert (vgl. Abb. 80).

Etwa bei $T_{\frac{1}{2}w}$ haben sich die Salzgehaltsgradienten umgekehrt (Messung 3 in Abb. 80) mit den stärksten Salzkonzentrationen in der Ems. Wegen der linksdrehenden Flutstromwalzen sind die Salzgehalte an der Ostmole (Pos. 2) höher als an der Westmole (Pos. 3). Mit zunehmender Flutstromdauer verstärkt sich das Gefälle zwischen der Ems und dem Hafenbereich (Messung 4 in Abb. 80). Mit den Flutstromwalzen strömt das Wasser vornehmlich an der Sohle in den Vorhafen. Die Salzgehalte an den Positionen 2 und 5 sind höher als bei 3 und 4. Bemerkenswert ist das zunehmende horizontale Gefälle mit der Wassertiefe zwischen Pos. 2 und 3. Die Flutwassermengen dringen an der Ostmole (Pos. 2) in den Hafen ein. Aufgrund des Dichteeffekts strömt das spezifisch leichtere Wasser an der Oberfläche aus dem Hafen. Wie in anderen Brackwasser-

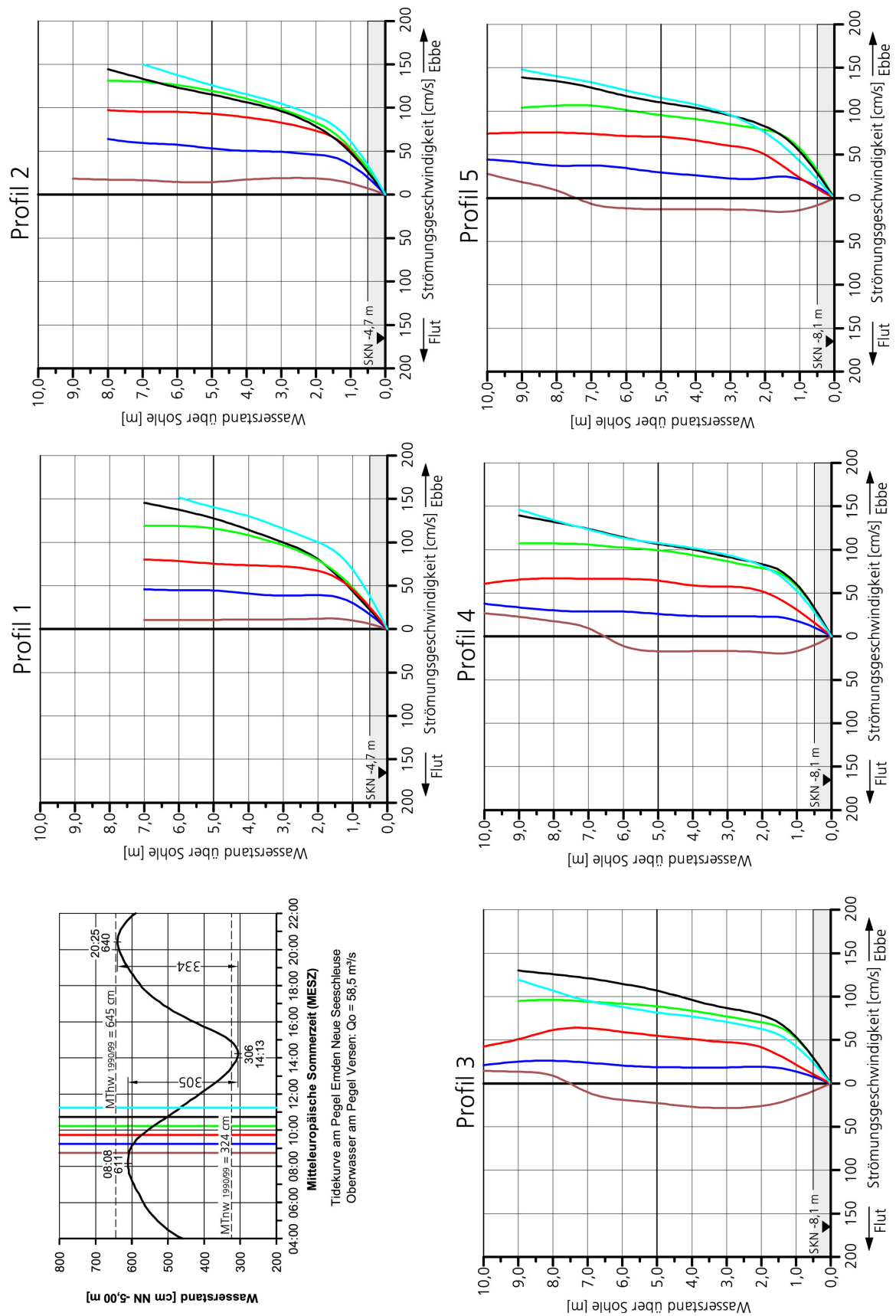


Abb. 76: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Ems am 01.06.2005

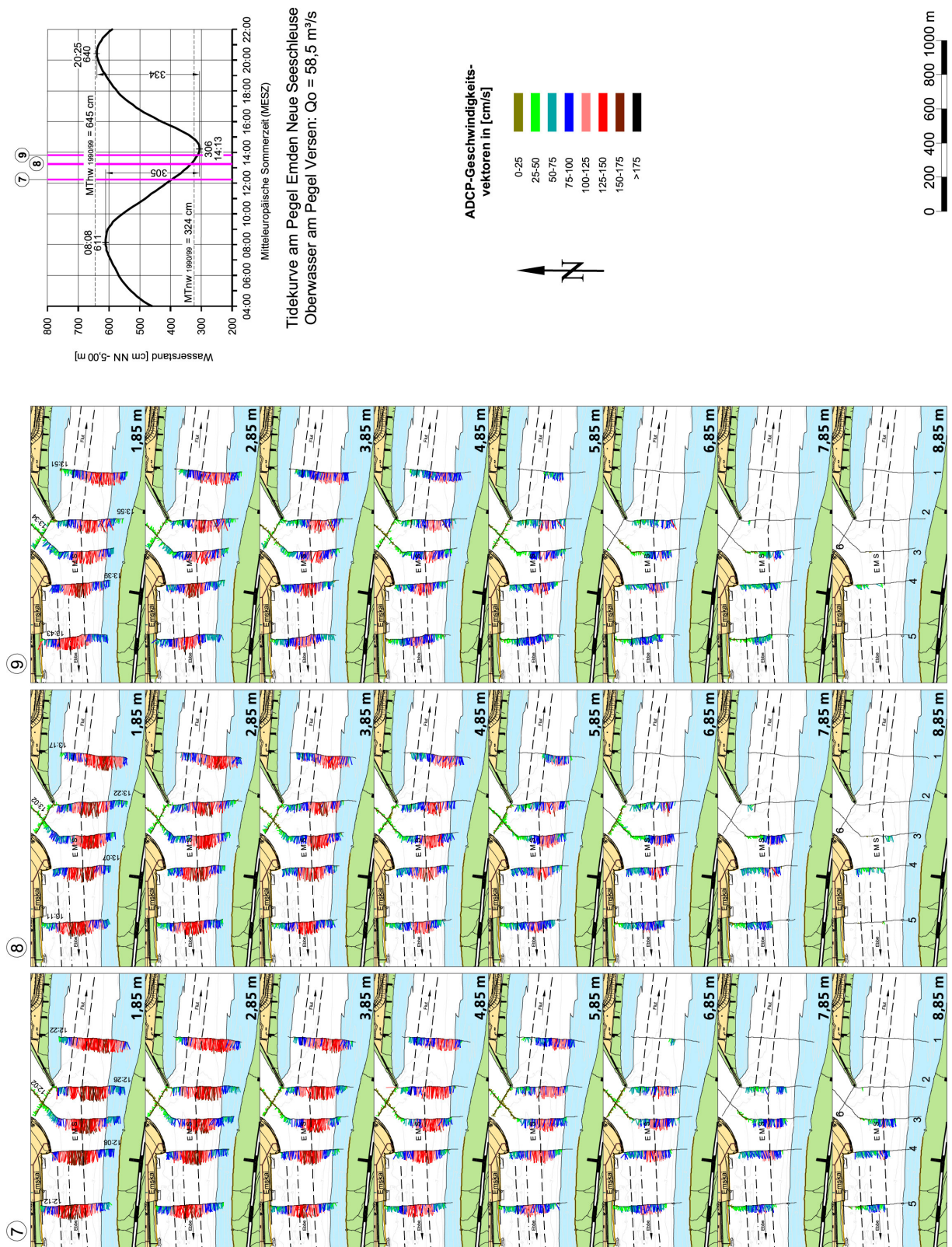


Abb. 77: Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 01.06.2005, 3. Ebbephase

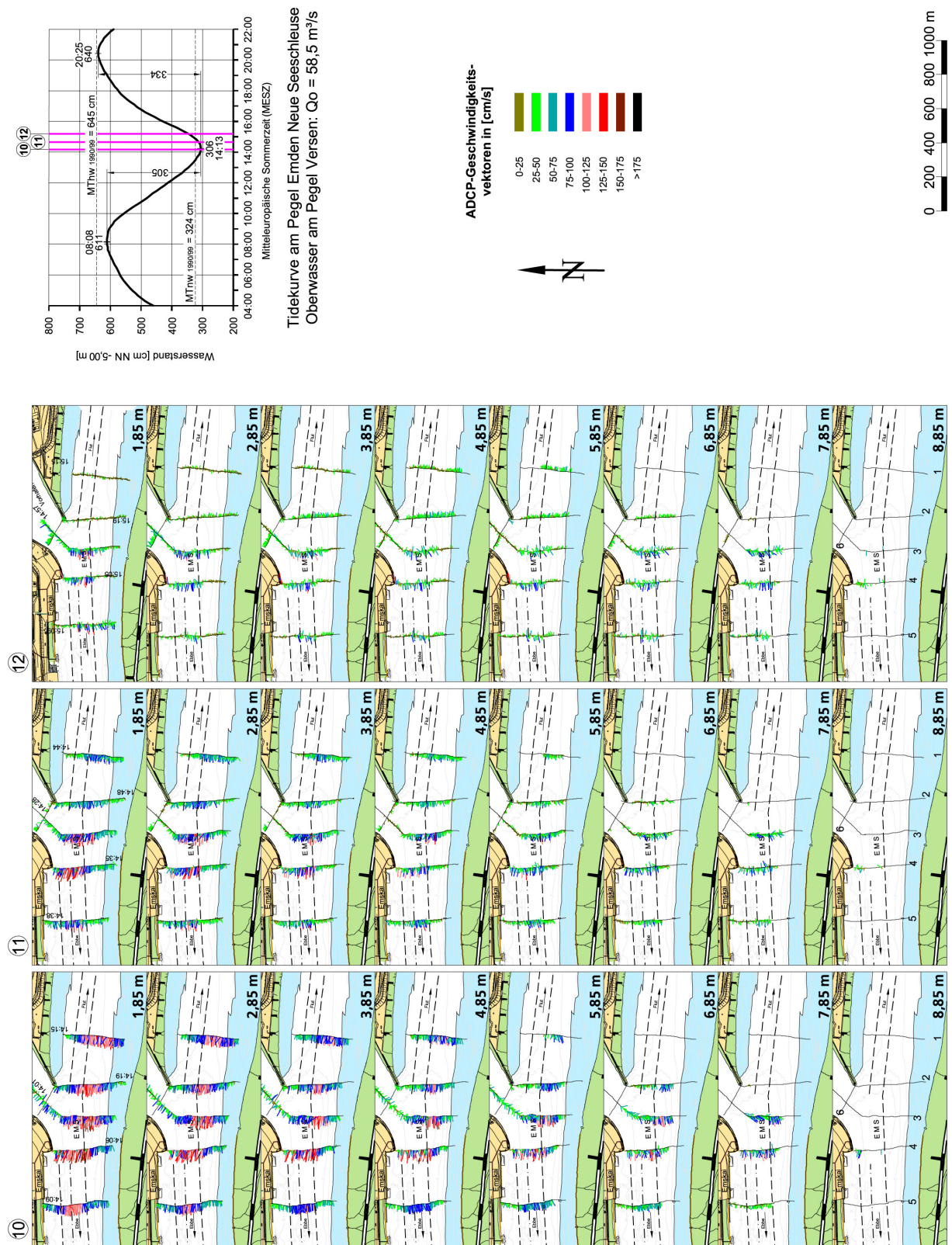


Abb. 78: Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 01.06.2005, 4. Ebbephase

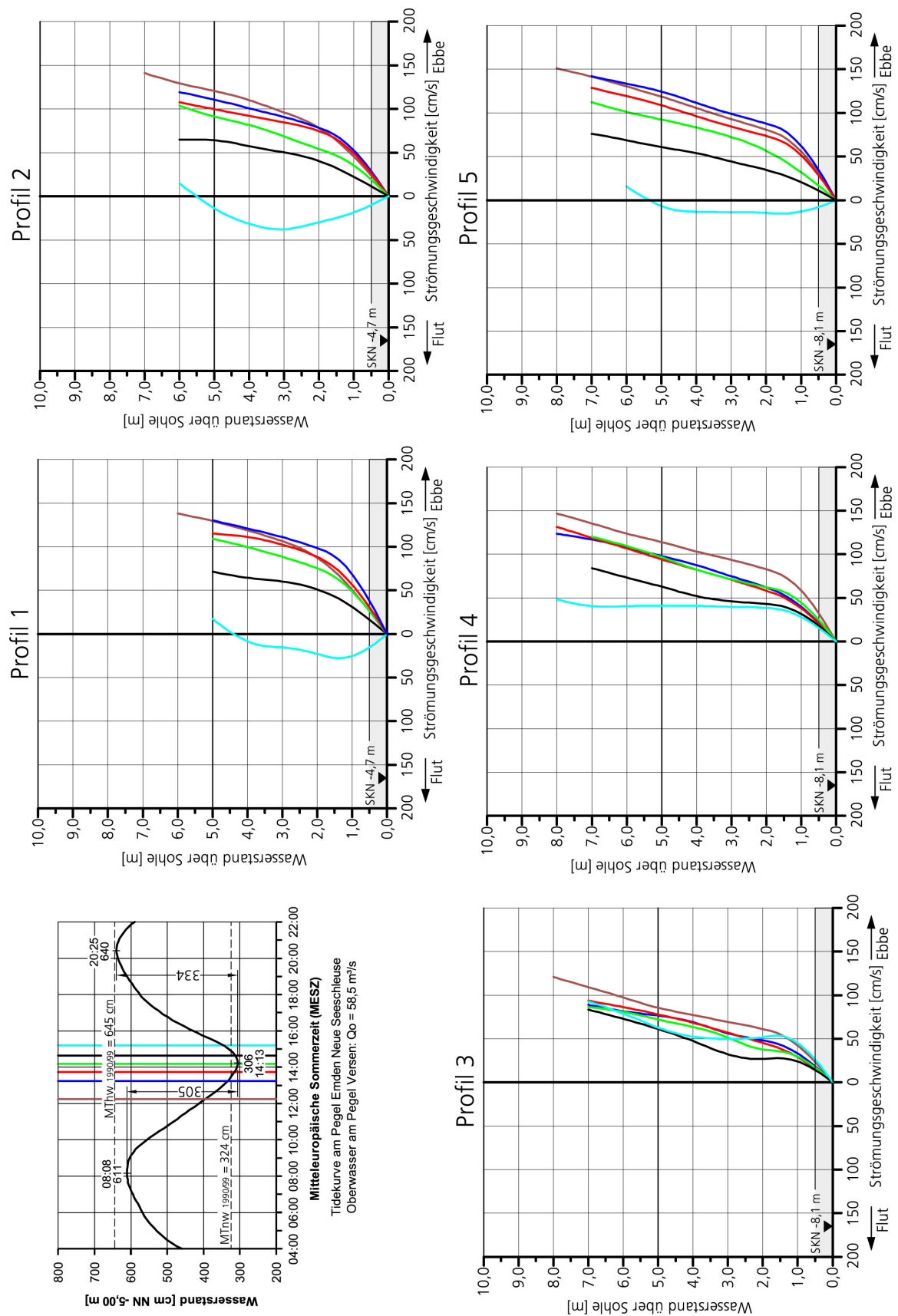


Abb. 79: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Ems am 01.06.2005

hären überlagern sich die Strömungseffekte (linksdrehende Walze in der Einfahrt mit vertikaler Achse) und Dichteeffekte (Einströmung an der Sohle und oberflächliche Ausströmung; Walze mit horizontaler Achse (NASNER, 2004a).

Die zunehmende Ausprägung der flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen zeigt sich an den starken Vertikal- und Horizontalgradienten. Beachtenswert ist auch das Gefälle in der Einfahrt zwischen Pos. 2 und 3 (Messungen 4 bis 6).

- **Ebbestromverhältnisse**

Auch während der Nipptide vom 2. Juni 2005 wurden bei Tidehochwasser bemerkenswerte Vertikalgradienten registriert. Dies zeigt ein Vergleich der letzten Messungen von Abb. 80 mit den ersten Profilen in Abb. 81. Die Zunahme der Salzgehalte über die Wassertiefe beträgt an allen Positionen $\Delta S > 5 \text{ ‰}$ (Messung 1 in Abb. 81). Das salzigere Wasser aus der Ems wird mit den Flutstromwalzen (dem Strömungseffekt) in den tieferen Wasserschichten in den Vorhafen transportiert (Pos. 1, 2 und 5). Im Außenhafen waren die Salzkonzentrationen deutlich schwächer (Pos. 3 und 4). Die geringeren Werte an der Oberfläche bedingt das aus dem Hafen zur Ems zurückströmende Wasser (Dichteeffekt).

Wie bei der Flut- kehren sich die Salzgehaltsgefälle zwischen dem Tidestrom und Vorhafen etwa ab Tidehalbwasser auch während der Ebbestromphase um (Messung 3 und 4 in Abb. 81). Der Vorgang dauert länger und ist später abgeschlossen als während der Flutstromphase. Anschließend werden die Ebbewassermengen durch den Strömungseffekt mit den im oberen Wasserkörper rechtsdrehenden Walzen in das Hafengebiet eingetragen (Pos. 3 in Abb. 81). Zu beachten sind dazu die von 14 ‰ (Messung 4) auf 8 ‰ (Messung 6) abnehmenden Salzgehalte in den oberen Schichten und die mit fortschreitender Tidedauer deutlich höheren Konzentrationen in den unteren Bereichen. Der besonders starke Wasseraustausch während der Niedrigwasserphase wird mit bei letzten Messung 6 mit den Positionen 1 und 3 dokumentiert (Abb. 81). Der Salzgehalt war unten um rd. 9 ‰ (Pos. 1) bzw. 7 ‰ (Pos. 3) größer als an der Wasseroberfläche. Das wird durch die relativ starken Ausströmungen im tiefen Wasser aus dem Vor- und Außenhafen verursacht. Interessant ist in diesem Zusammenhang der Vergleich mit der ersten Messung in Abb. 81 bei entgegengesetzten Strömungsverhältnissen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die Überlagerungen der Walzen- und Dichteströmungen bei Flut- und Ebbestrom mit den vertikalen und horizontalen Salzgehaltsverteilungen in der Ems und den Schleusenvorhäfen erklären lassen.

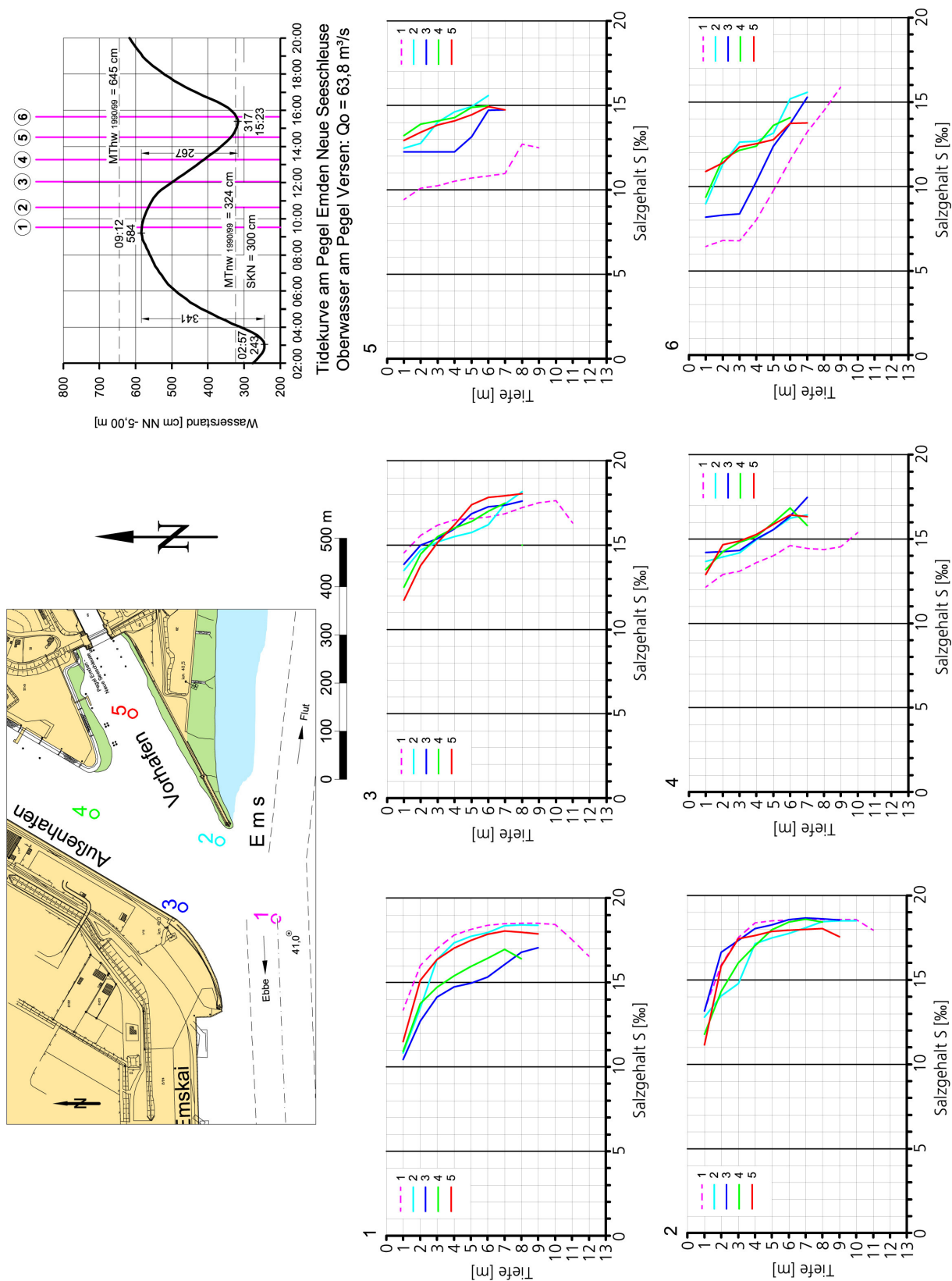


Abb. 81: Salzgehalte im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, Ebbe am 02.06.2005

5.3 Schwebstoffe

• Flutstromverhältnisse

Bei der Springtide vom 26. Mai 2005 wurden noch nach Tideniedrigwasser während der letzten Ebbestromphase hohe Schwebstoffkonzentrationen in der Ems ermittelt (Pos. 1 in Abb. 82, Messung 1). Es ist nachvollziehbar, wie die Sedimente aus der Ems an der Wasseroberfläche über die Ebbestromwalze in den Außenhafen transportiert werden (Pos. 1 bis 4). Im Vorhafen sind die Schwebstoffgehalte deutlich geringer (Pos. 5). Das im tieferen Wasser dichtebedingt zur Ems zurückströmende Wasser war ebenfalls schwebstoffärmer (Pos. 2, 4 und 5).

Während der ersten Flutstromphase (Messung 2) gingen die Feststoffkonzentrationen vor der Einfahrt in der Ems stark zurück. Besonders starke Turbulenzen waren am Staupunkt der Flutströmungen, dem Kopf der Ostmole zu beobachten (Pos. 2).

Kennzeichnend sind die geringen Schwebstoffgehalte in der Ems bei weiter fortschreitender Tidephase. Bereits bei der 3. Messung in Abb. 82 wurden nur noch $C_s \approx 250 \text{ mg/l}$ mit abnehmender Tendenz bis zu $C_s \approx 100 \text{ mg/l}$ bei Thw. Gleichzeitig verursachen die Strömungs- und Dichteeffekte im Vor- und Außenhafen bei voll ausgeprägtem Flutstrom besonders hohe Schwebstoffkonzentrationen bis hin zu den oberen Wasserschichten. Erst rd. 1 Stunde vor dem Eintritt des Tidehochwassers ab Messung 5 wurden geringere Schwebstoffgehalte festgestellt.

Die bei Thw durchgeführte Messung 6 in Abb. 82 zeigt, wie in größerer Wassertiefe schwebstoffhaltigeres Wasser mit der Flutstromwalze in den Vorhafen gelangt (Pos. 2). Auch an den Pos. 3 und 5 sind im tieferen Wasser höhere Suspensionen festzustellen. Das an der Oberfläche zur Ems zurückströmende Wasser ist weniger schwebstoffhaltig.

• Ebbestromverhältnisse

Am 2. Juni 2005 betrug der Tidefall lediglich 267 cm. Dementsprechend gering waren die Schwebstoffkonzentrationen in der Ems und den Schleusenvorhöfen Abb. 83. Die insgesamt geringeren Schwebstofffrachten während der Ebbephase sind auch in Bremerhaven nachgewiesen worden. Sie sind auf die im Brackwasserbereich tideabhängig veränderlichen Salzgehalte und die daraus entstehenden Strömungen mit geringerer Transportkapazität zurückzuführen. So haben auch die vorstehend erläuterten Strömungsmessungen gezeigt, dass in der Ems während der Flut die Sohlströmungen und in der Ebbestromphase die Oberflächenströmungen verstärkt werden.

Bei der Messung vom 2. Juni 2005 wurden in den oberen Wasserschichten erst in der fortgeschrittenen Ebbestromphase in der Ems Schwebstoffkonzentrationen von $C_s > 500 \text{ mg/l}$ ermittelt (Abb. 83). Die stärksten Konzentrationen wurden wie bei den Flutmessungen (Abb. 82) zur Tideniedrigwasserphase ermittelt. Bei der Messung 6 ist zu erkennen, wie der Feststoffeintrag in den Vor- und Außenhafen stattfindet. Das Material gelangt oberflächlich mit der rechtsdrehenden Ebbestromwalze (Pos. 3) in den Hafenbereich. Im unteren Bereich strömt weniger schwebstoffhaltiges Wasser zur Ems zurück. Die geringsten Schwebstoffkonzentrationen waren in der letzten Ebbestromphase im Vorhafen festzustellen (Abb. 83, Messung 6 und Abb. 82, Messung 1).

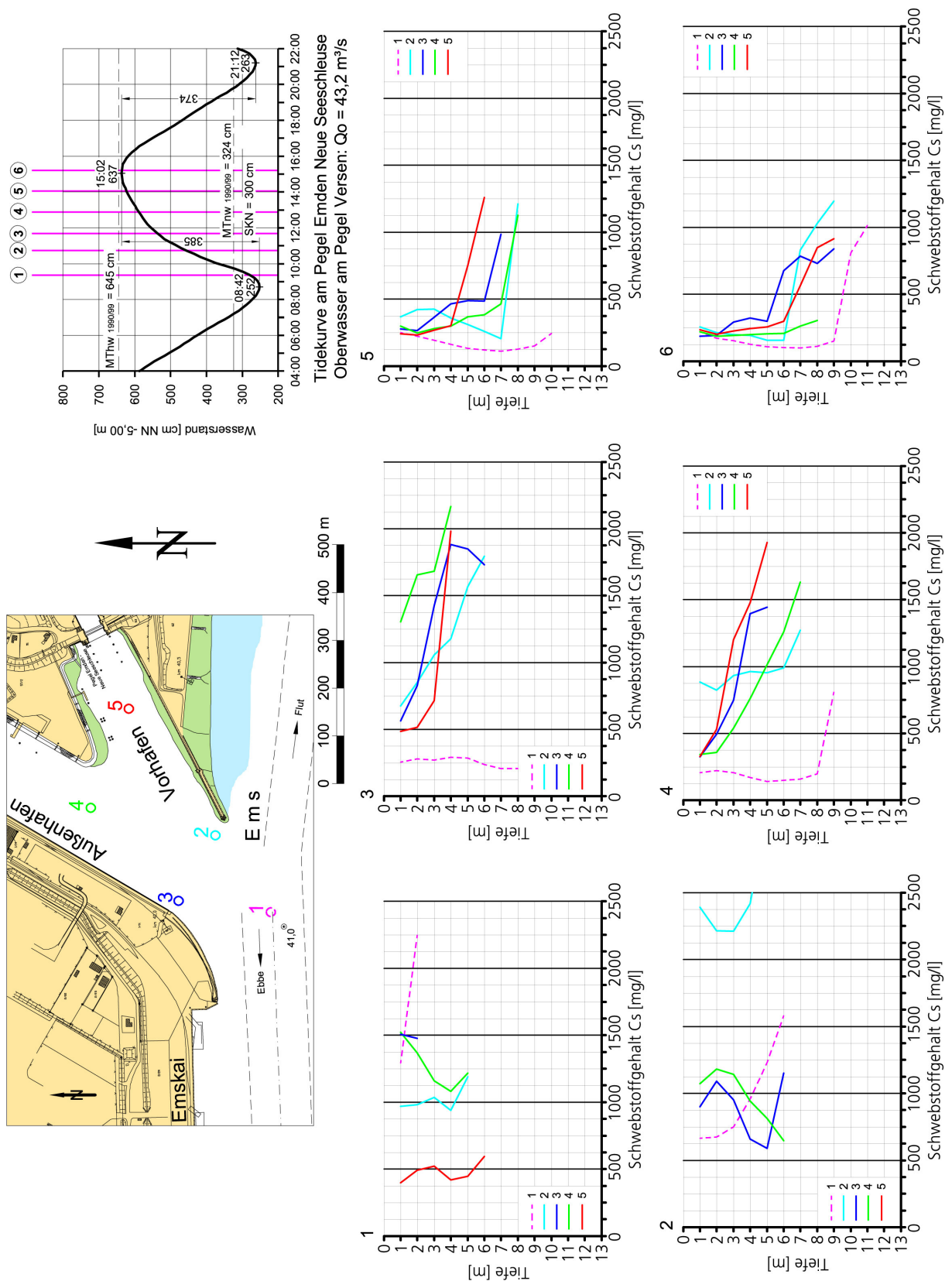


Abb. 82: Schwebstoffe im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, Flut
26.05.2005

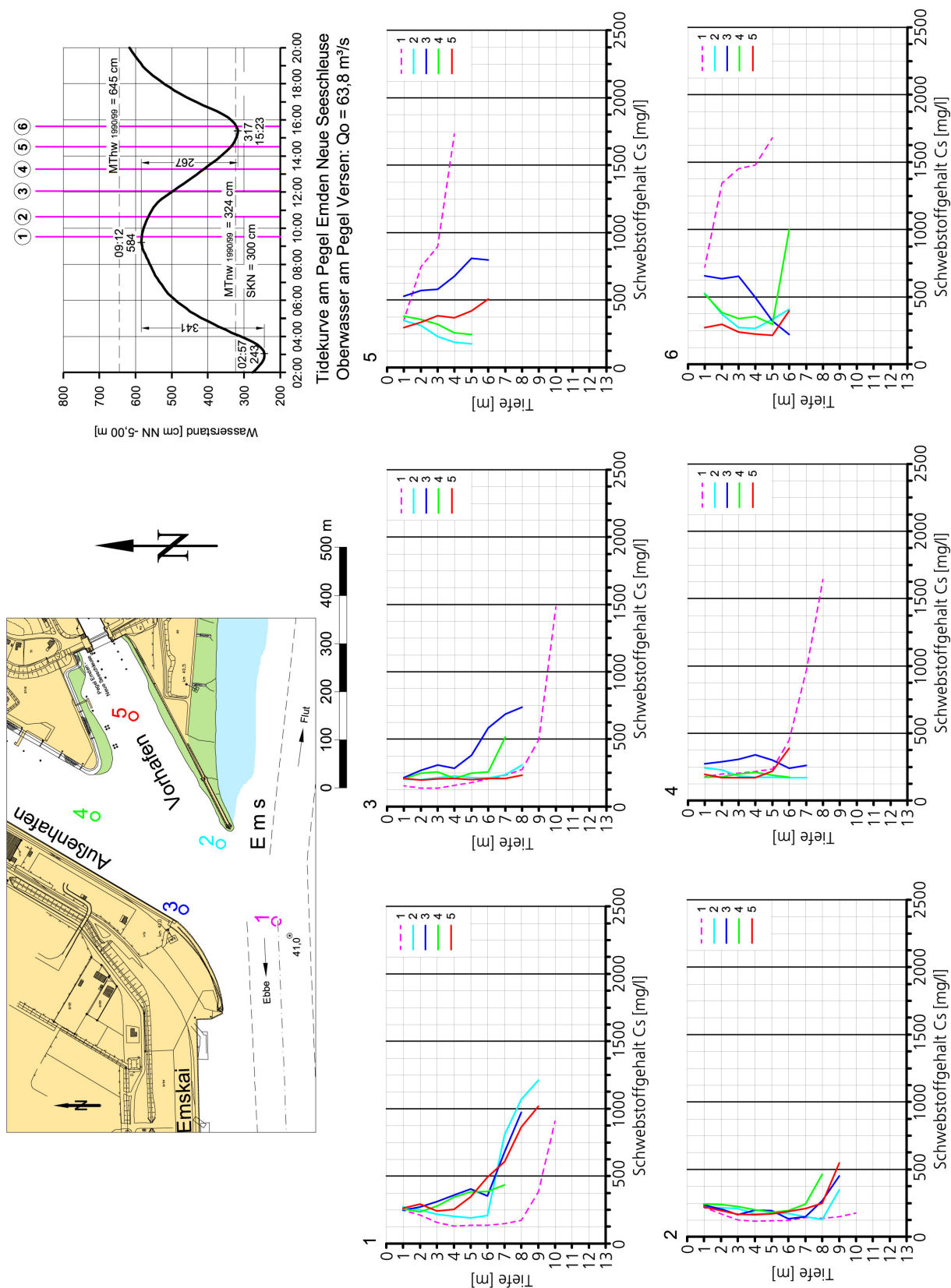


Abb. 83: Schwebstoffe im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, Ebbe
02.06.2005

5.4 Strömungen im Vor- und Außenhafen in Emden

• Flutströmungen

Mit den Flutstrommessungen wurde bei etwa mittleren Tide- und Oberwasserbedingungen am 10. Juni 2002 rd. 1,5 Stunden nach Tideniedrigwasser begonnen (Abb. 84). Bei etwa mittlerem Oberwasser ($Q_0 = 53,3 \text{ m}^3/\text{s}$) betrug der Tidestieg 347 cm am Pegel Emden Neue Seeschleuse. Im Längsprofil zum Außenhafen sind innen bei der ersten Messung in den oberen Tiefenzellen noch schwache Einstömungen auszumachen (Abb. 84). In der unteren Wasserschicht (7,85 m) ist es umgekehrt. Mit sich voll ausprägendem Flutstrom wurden in der Ems Strömungsgeschwindigkeiten mit Maximalwerten von $v_f > 175 \text{ cm/s}$ erreicht. Auffällig ist der vergleichsweise schwache Vertikalgradient gegenüber der tiefer ausgebauten Weser.

Die Messung 2 in Abb. 84 zeigt die unterschiedlichen Strömungsverhältnisse nach Tidehalbwasser in der oberen (1,85 m) und den unteren (5,85 m und 7,85 m) Tiefenzellen an der Hafeneinfahrt. Oben sind Ausströmungen auszumachen. Im tiefen Wasser sind dagegen Strömungen in den Vorhafen an der Ostmole zu verzeichnen.

Bei den Querprofilen in der Ems ist übrigens der Sohl sprung von 3,4 m (vgl. Abb. 6) zu beachten. Das erklärt die geringeren Fließgeschwindigkeiten in den tiefen Wasserschichten oberhalb der Hafeneinfahrt.

Ab etwa 3 Stunden nach Tnw prägen sich im Emden Vorhafen mit sich abflachendem Flutast die tideabhängigen Strömungseffekte aus (Messung 2 und 3 in Abb. 84). An den ADCP-Profilen in der Hafeneinfahrt ist zu erkennen, wie die Wassermassen in den oberen Schichten aus den Hafen strömen. Die Oberflächenströmungen wirken sich bis in das Fahrwasser der Ems aus. In den unteren Tiefenzellen dringt das Wasser aus der Ems mit zunehmender Intensität entlang der Ostmole in den Vorhafen. Dabei wurden absolute Werte von bis zu $v > 50 \text{ cm/s}$ gemessen. In dieser Tidephase werden, wie bei den Vorhäfen in Bremerhaven, Walzenströmungen angefacht, von denen aus das salzigere Wasser der Ems sohlennah in den Vorhafen eindringt. Damit wird die Dichtestromwalze erzeugt, mit der das Wasser an der Oberfläche aus dem Hafen verdrängt wird.

In Abb. 85 ist die letzte Flutstromphase, Kenterung und einsetzende Ebbestromphase in der Ems dargestellt. An den Profilen vor und in der Hafeneinfahrt sind die oben und unten entgegengesetzten Dichteströmungen erkennbar.

• Ebbeströmungen

Die Strömungsverhältnisse bei einer Springtide und erhöhtem Oberwasser wurden am 4. November 2002 mit Dopplermessungen aufgenommen (Abb. 86). Der Tidefall betrug am Pegel Emden Neue Seeschleuse 386 cm und das Oberwasser in Versen $Q_0 = 167 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Flutstromkenterung in der Ems trat knapp eine Stunde nach Thw ein (Abb. 86, Messung 1). Auch nach eingesetzter Ebbeströmung in der Ems dauern die fluterzeugten Dichteströmungen noch an (Messung 2). In der oberen Tiefenzellen (1,85 m) sind die Strömungen nach außen zur Ems gerichtet. Im tieferen Wasser (ab 5,85 m) ist es entgegengesetzt. Erst in der dritten Stunde

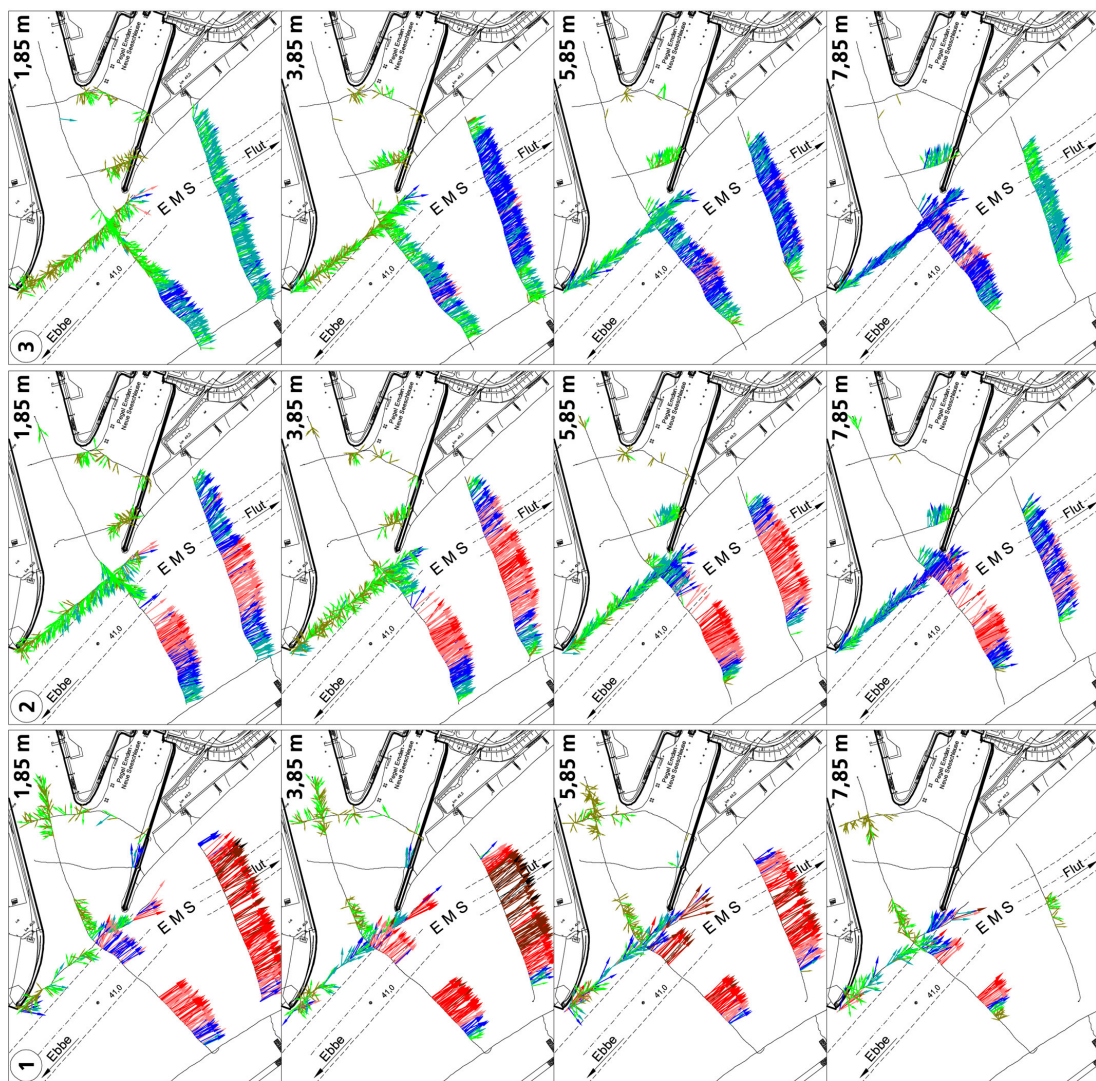
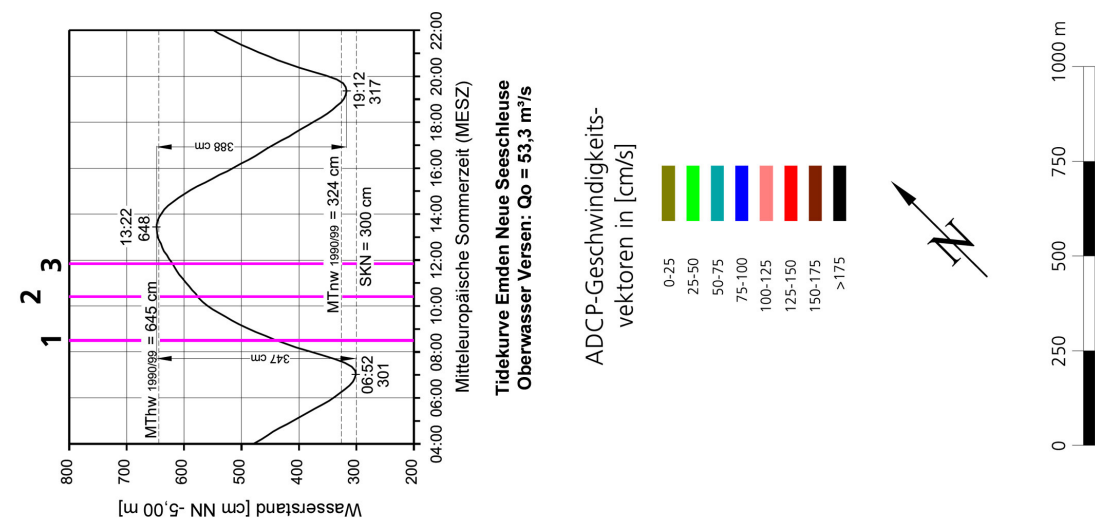


Abb. 84: Flutstrommessungen im Bereich des Emden Vor- und Außenhafens am 10.06.2002, erste Flutphase

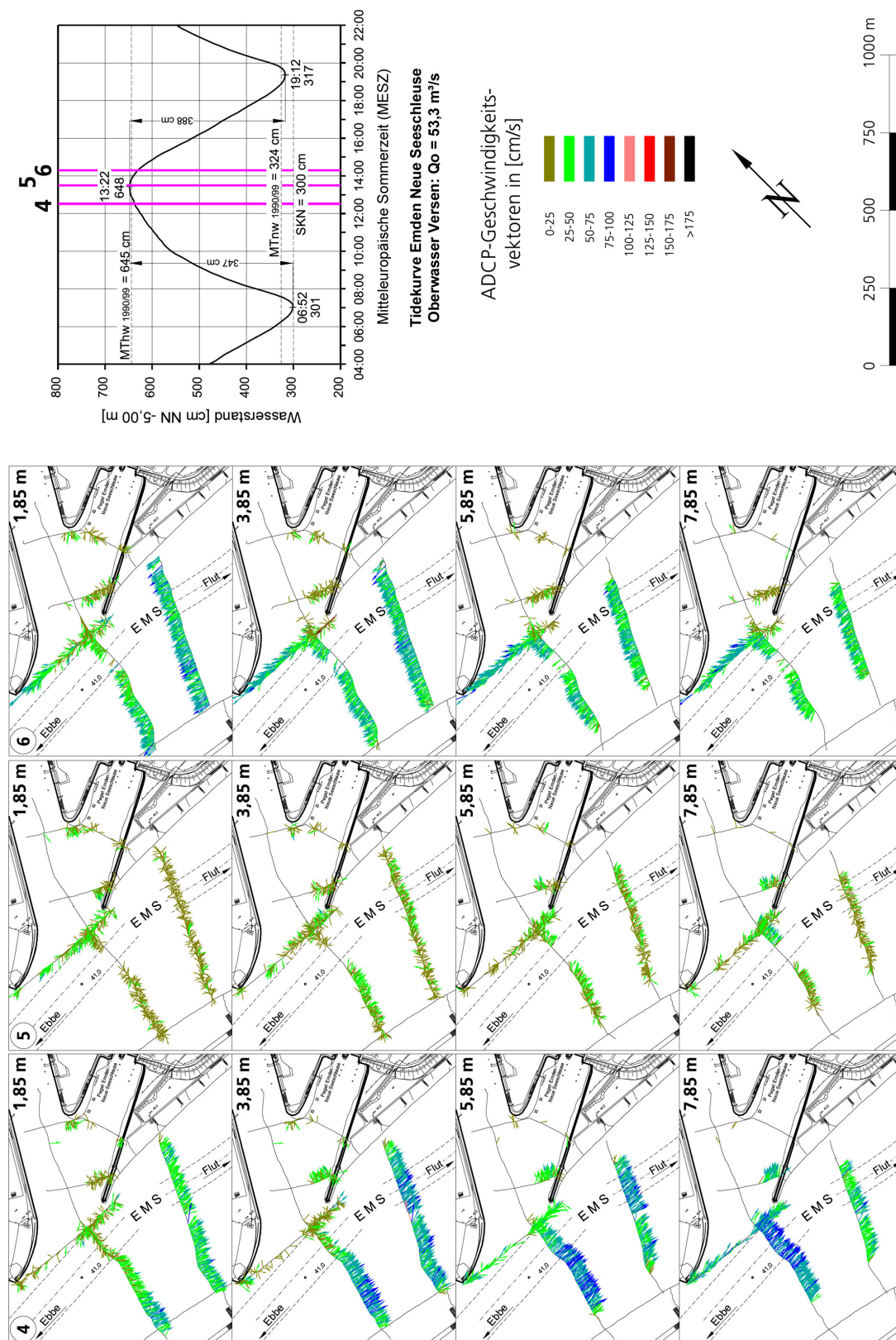


Abb. 85: Flutstrommessungen im Bereich des Emdr Vor- und Außenhafens am 10.06.2002, letzte Flutphase

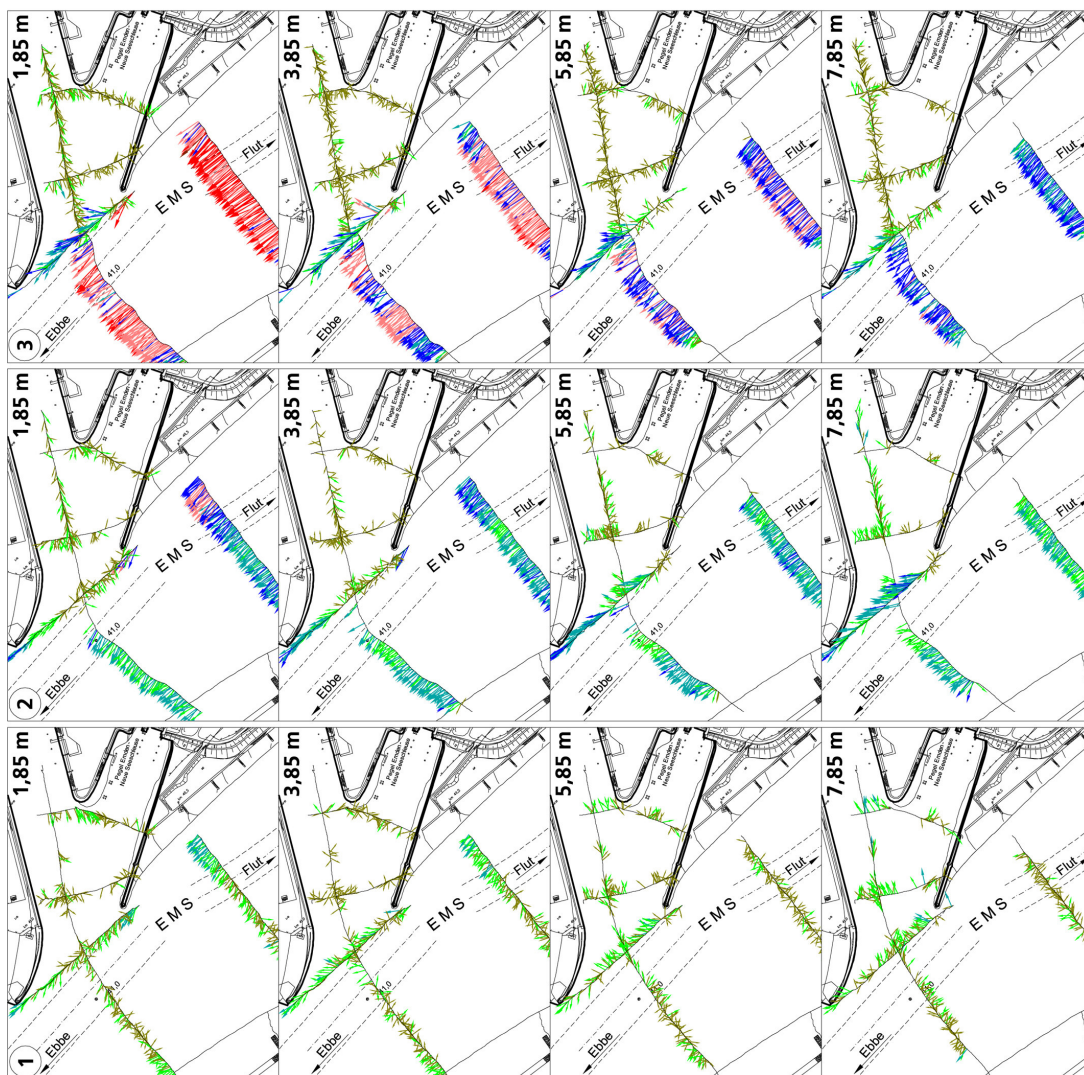
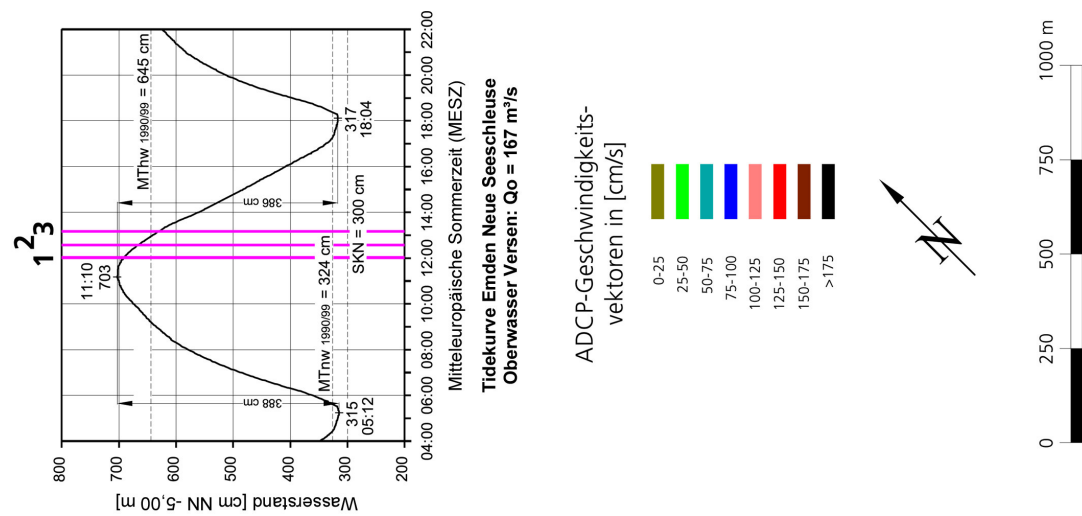


Abb. 86: Ebbestrommessungen im Bereich des Emden Vor- und Außenhafens am 04.11.02, erste Ebbephase

nach dem Tidehochwasser kam es zur Umkehrung (Messung 3, Abb. 86).

Wegen des vergleichsweise hohen Oberwassers wurden bei vollem Ebbestrom (etwa $T_{\frac{1}{2}w}$) an der Wasseroberfläche der Ems maximale Fließgeschwindigkeiten von $v_{max} \approx 200$ cm/s erreicht (Abb. 87, Messung 4). Mit dementsprechend hoher Energie gelangen die Wassermassen in den äußeren westlichen Vorhafen. Dadurch werden in den oberen Tiefenzellen (bis 3,85 m) rechtsdrehende Walzenströmungen angefacht mit merklich geringerer Energie an der Ostmole. Aus der Ebbestromwalze heraus strömt das Wasser oben in den Außenhafen und verursacht die Ausströmung in den tieferen Wasserschichten (7,85 m). Mit zunehmender Ebbestromdauer stabilisieren sich die Dichteströmungen in den oberen und unteren Wasserschichten (Messung 5, Abb. 87). Im dazwischen liegenden Wasserkörper mit sehr hohen Feststoffkonzentrationen finden dagegen weniger turbulente hydrodynamische Vorgänge statt.

Bei weiter fortschreitender Ebbedauer verstärken sich die Einströmungen in den westlichen Vorhafen bis zu $v_e > 50$ cm/s (Messung 6). Auch die dichtebedingten Ausströmungen hielten bis 1 Std. vor T_{hw} fast unvermindert an.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die tideabhängigen Walzen- und Dichteströmungen in den Vorhäfen an der Ems und Weser trotz der unterschiedlichen Randbedingungen miteinander vergleichbar sind und verallgemeinert werden können.

Die Dichteströmungen in den Schleusenvorhäfen werden jeweils etwa ab Tidehalbwasser ausgeprägt, sie verstärken sich im weiteren Tideverlauf und bleiben bis nach der Kenterung erhalten. Während der Flut werden die Dichteströmungen über die an der Sohle besonders intensiven Walzenströmungen angefacht. Das sohlennah eindringende salzhaltigere Wasser verdrängt das spezifisch leichtere Wasser in der oberen Wasserschicht zurück in den Tidestrom. Während der Ebbestromphase sind die Vorgänge entgegengesetzt.

5.5 Salzgehalte

• Flutstromverhältnisse

Die Salzgehaltsveränderungen in der Ems sowie dem Emdor Vor- und Außenhafen sind beispielhaft für die Springtide vom 20. Juli 2000 und einem Oberwasser von $Q_0 = 43$ m³/s in Abb. 88 dargestellt. In Übereinstimmung mit den Untersuchungen für Bremerhaven sind während der Niedrigwasserstände auch in der Ems niedrigere Salzgehalte zu verzeichnen als im Vor- und Außenhafen (Messung 1, Abb. 88). Bemerkenswert ist das starke Gefälle von der Ems bis zur Pos. 1 im rd. 1.400 m langen Außenhafen von $\Delta S \approx 10$ ‰. Bei der zweiten Messung ist erkennbar, wie sich die Salzkonzentrationen in der ersten Flutstromphase annähern. Beachtenswert ist der starke Vertikalgradient in der ersten Flutstromphase im flacheren Wasser bei der Pos. 5 oberhalb der Hafeneinfahrt.

Das horizontale Salzgehaltsgefälle zwischen Ems und Hafen hatte sich in der dritten Stunde nach T_{hw} umgekehrt (Messung 3 in Abb. 88) bei insgesamt geringer werdenden Vertikalgradienten der Salzgehaltsprofile in der Ems.

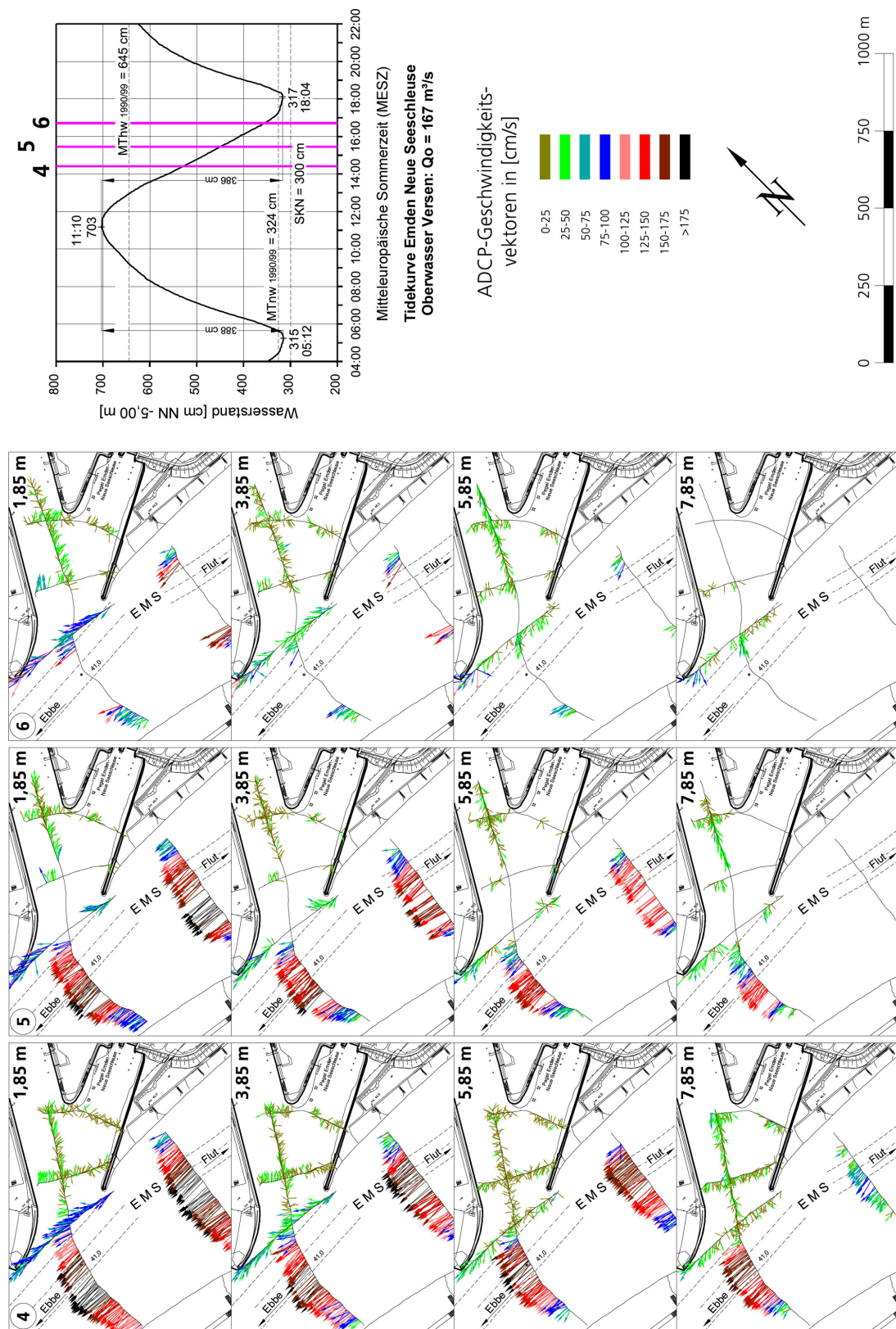


Abb. 87: Ebbestrommessungen im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens am 04.11.02, letzte Ebbephase

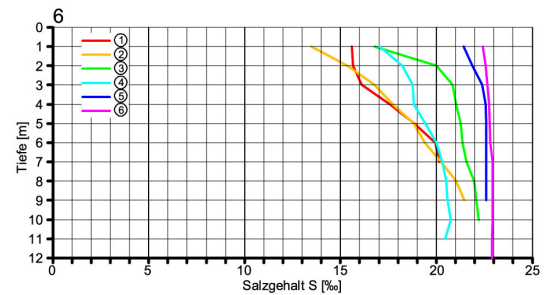
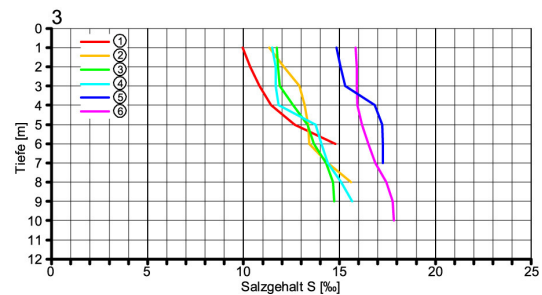
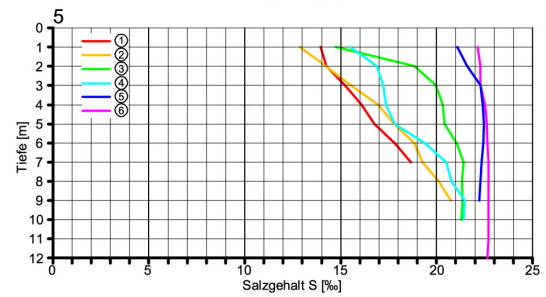
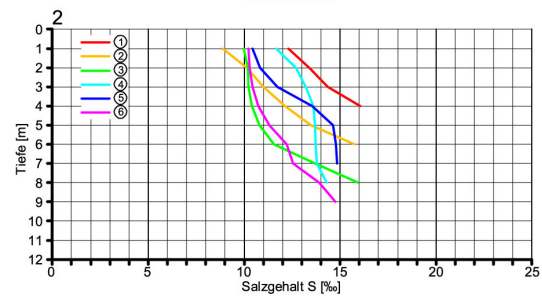
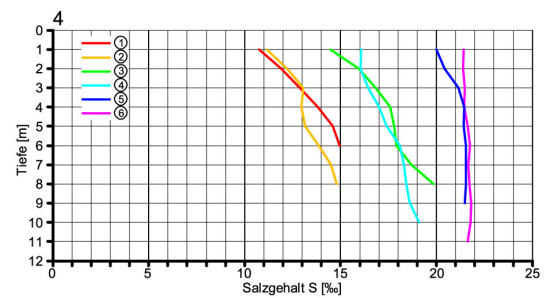
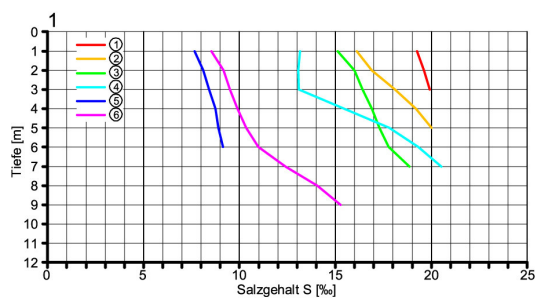
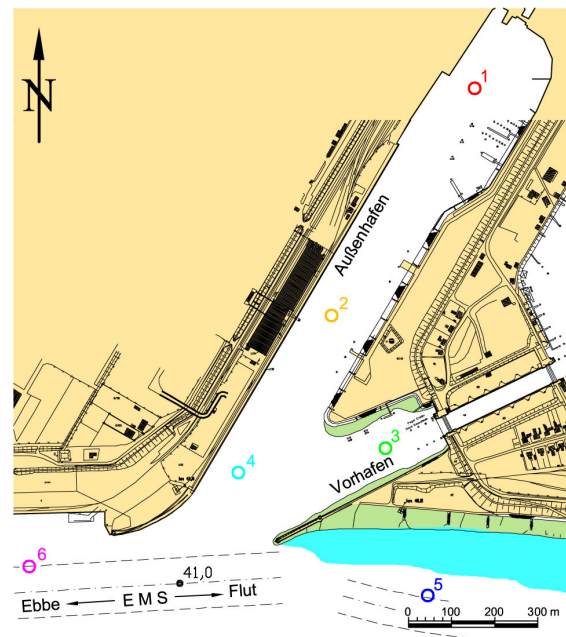
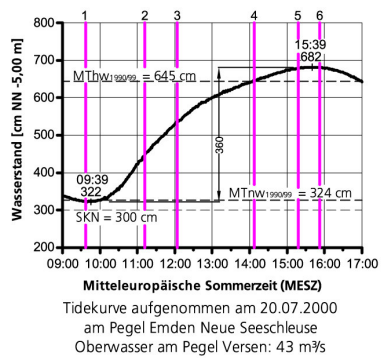


Abb. 88: Salzgehalte im Bereich des Emden Vor- und Außenhafens, Flutmessung 20.07.2000

Ab $T_{\frac{1}{2}}^1$ w (Messung 3) werden über die sohlennahen Walzenströmungen die Dichteströmungen ausgelöst. Abb. 88 veranschaulicht, wie sich damit die vertikalen Salzgehaltsgefälle bei den Profilen im Hafenbereich wieder verstärken. Mit diesem Vorgang ist die Zunahme der absoluten Salzgehalte bis zum Eintritt des Tidehochwassers verbunden. Außerdem geht aus Abb. 88 die phasenverschobene Erhöhung der Salzgehalte innerhalb des Hafens zwischen den äußeren (Position 3 und 4) und inneren Messstellen (Position 1 und 2) hervor.

- **Ebbestromverhältnisse**

Die bei dem Nipptidefall von 289 cm ($Q_0 = 47 \text{ m}^3/\text{s}$) am 26. Juli 2000 ausgeführten Messungen vervollkommen das für die Flutströmungen aufgezeichnete Bild (Abb. 89).

Bei Tidehochwasser sind die Salzgehalte in der Ems mit $S > 20 \text{ ‰}$ vor allem an der Oberfläche deutlich höher als im Vorhafen (Messung 1, Abb. 89). Bei Tideniedrigwasser (Messung 6, Abb. 89) wurde, wie bei der Flutmessung, ein starkes horizontales Gefälle von $\Delta S \approx 10 \text{ ‰}$ zwischen Position 1 und der Ems registriert.

Die Umkehr des Horizontalgradienten vollzieht sich in der zweiten Stunde nach Thw (Messung 2). Ab $T_{\frac{1}{2}}^1$ w verstärkt sich das Salzgefälle vom Hafen zur Ems mit zunehmender Ebbedauer und sich intensivierenden Dichteströmungen. Bezeichnend ist wieder das besonders starke horizontale Gefälle bei Tnw. Ebenso fallen die ausgeprägten Vertikalgradienten in der Hafeneinfahrt als Ergebnis der Dichteströmungen (Position 4) bei Thw und Tnw, sowie die relativ geringen Unterschiede bei Tidehalbwasser auf (Abb. 89, Profil 3).

Abschließend bleibt festzustellen, dass die für den Dichteeffekt in den brackwasserbeeinflussten Vorhäfen der Weser und Ems maßgebenden, im Tiderhythmus veränderlichen Salzgehalte trotz der unterschiedlichen Randbedingungen miteinander vergleichbar sind. Im Emder Außenhafen kommt es dabei wegen der relativ großen Länge von rd. 1.400 m vor allem während der Ebbe bei niedrigen Tidewasserständen zu besonders starken Salzgehaltsgefällen zwischen dem Außenhaupt der Nesserlander Schleuse und der Ems.

5.6 Schwebstoffe

- **Flutstromverhältnisse**

Die mit der mobilen Sonde während der Springtide vom 20. Juli 2000 gemessenen Schwebstoffkonzentrationen sind in Abb. 90 dargestellt.

Die größere Länge des Emder Außenhafens gegenüber den Vorhäfen der Kaiser- und Nordschleuse, der Sohlprung oberhalb der Hafeneinfahrt, sowie die anstehende, stabile Fluid Mud Lage führt zu besonderen Schwebstoffverhältnissen im Tideablauf.

Im inneren Außenhafen wird das Schwebstoffgeschehen durch den Tide- oder Strömungseffekt nicht mehr merklich beeinflusst (Abb. 90, Position 1). Auch durch den Dichteeffekt treten dort keine morphologisch nachhaltigen hydrodynamischen Vorgänge mehr auf. Über der sich im Gleichgewichtszustand befindlichen Fluid Mud Schicht bleiben die Feststoffkonzentrationen nahezu unverändert. Die feinen Partikel verharren im Schwebzustand bei Konzentrationen von

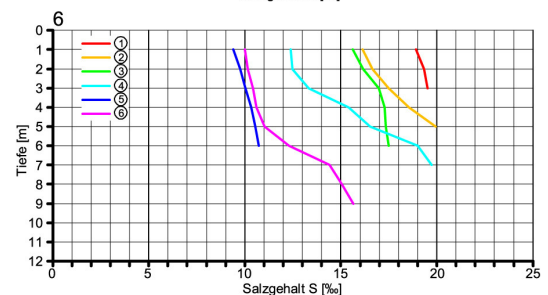
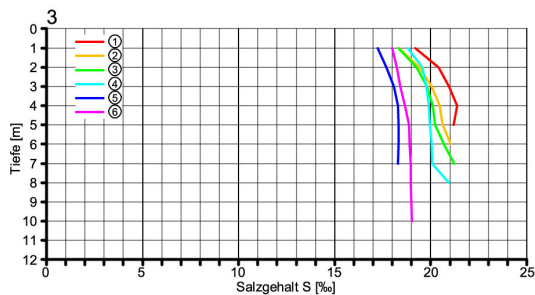
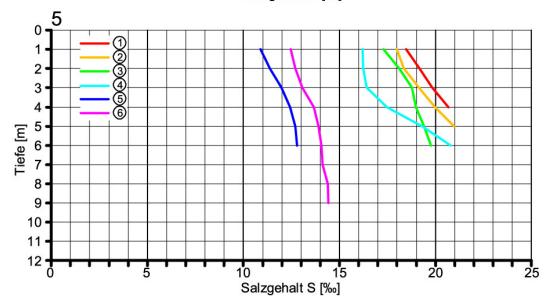
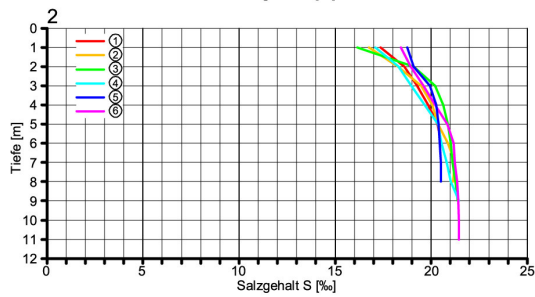
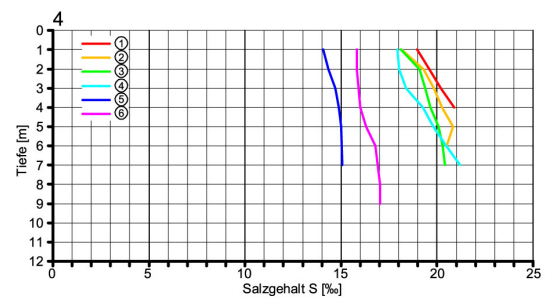
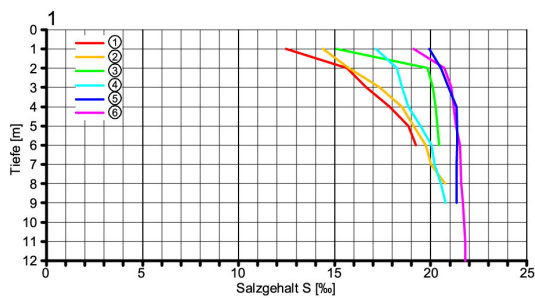
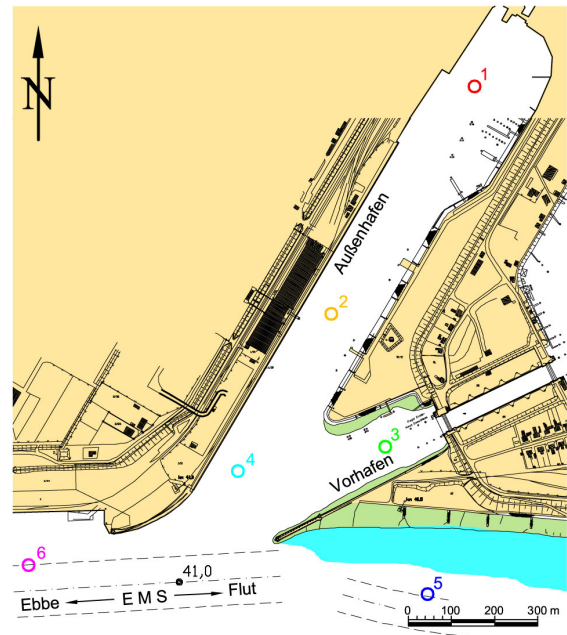
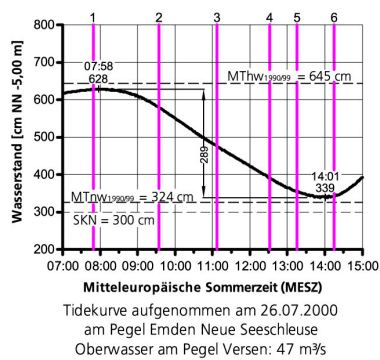


Abb. 89: Salzgehalte im Bereich des Emden Vor- und Außenhafens, Ebbemessung 26.07.2000

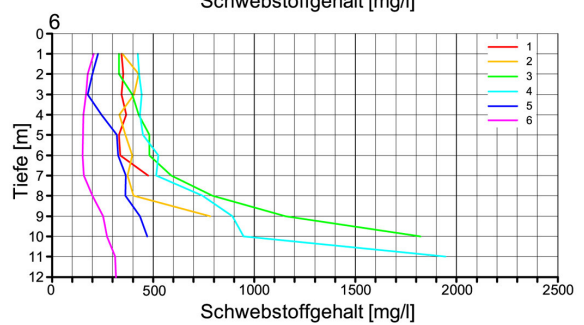
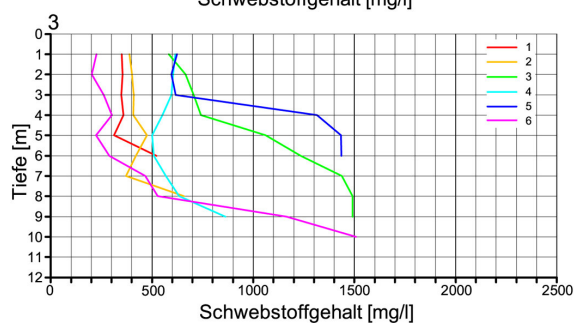
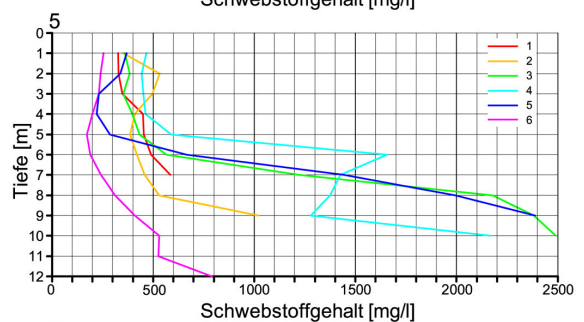
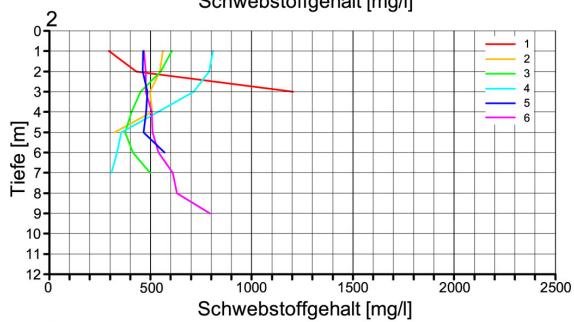
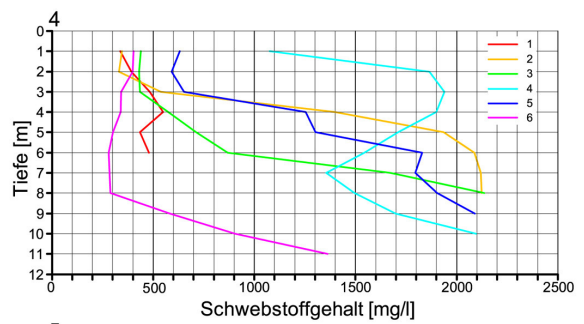
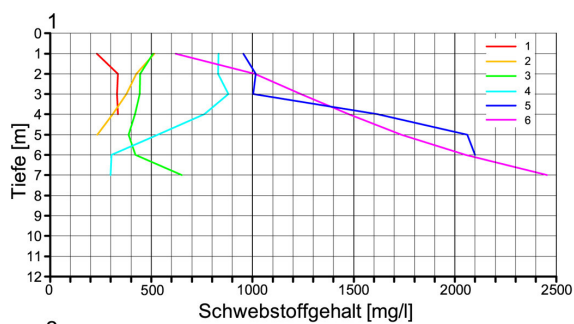
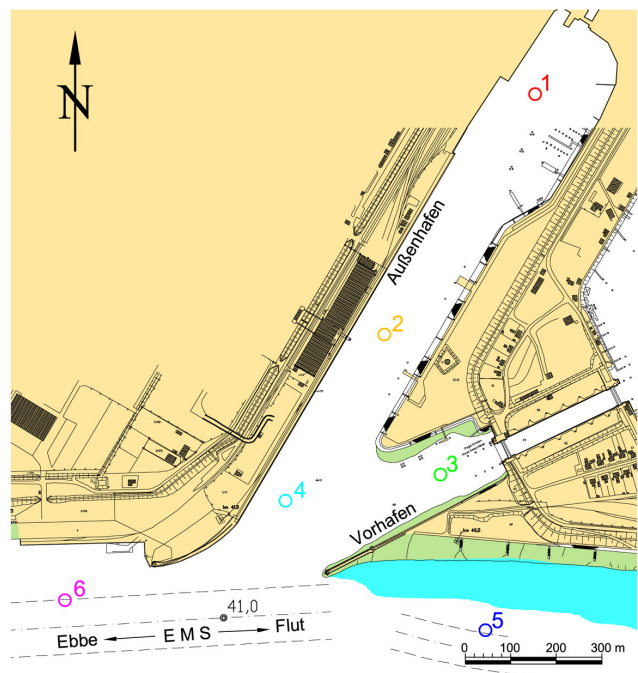
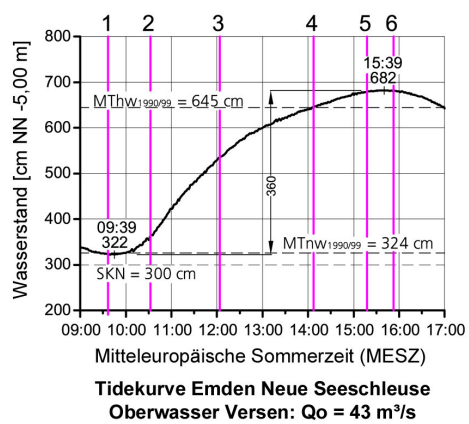


Abb. 90: Schwebstoffe im Bereich des Emden Vor- und Außenhafens, Flutmessung 20.07.2000

$C_S \approx 300$ bis 500 mg/l. Die höheren Werte bei der zweiten Messung sind auf Schiffsbewegungen zurückzuführen.

Weiter außen finden strömungs- und dichtebedingte Austauschvorgänge mit der Ems statt (Pos. 2 bis 4 in Abb. 90). Während der späteren Ebbestromphase werden relativ hohe Schwebstoffkonzentrationen aus der Ems an der Wasseroberfläche entlang der Westmole in den Hafen transportiert (vgl. Abb. 87). Dieser Vorgang hält bis zur Strömungsumkehr in der Ems an (Messung 1 und 2 in Abb. 90). Zur Kenterphase kommt es vorübergehend zu deutlich geringeren Schwebstoffkonzentrationen in der Ems.

Während der Flutstromphase erhöht sich die Feststofffracht im Tidestrom besonders im flacheren Wasser oberhalb des Sohlensprungs (Abb. 90, Messung 3 und 4). Der sich bei Tidehalbwasser im tiefen Wasser verstärkende Energieeintrag über die Walzen- und Dichteströmungen entlang der Ostmole (vgl. Abb. 84, Messung 2) führt zunächst dort zur Sedimentanreicherung des Wasserkörpers. Dabei handelt es sich offenbar mehr um die Remobilisierung von Feststoffen, weil das Wasser im Emder Vor- und Außenhafen bereits mit Schwebstoffen gesättigt ist.

Mit den sich nach $T_{\frac{1}{2}w}$ verstärkenden Dichteströmungen erhöhen sich die Schwebstoffkonzentrationen im Vor- und Außenhafen bis zu $C_S \approx 2000$ mg/l (Abb. 90, Messung 4, Position 2 und 3).

Gleichzeitig werden in den oberen Wasserschichten entsprechend hohe Konzentrationen durch den Dichtestromeffekt in die Ems zurücktransportiert (Messung 4, Position 4 in Abb. 90). Aufgrund der Sättigung des Außenhafens mit Schwebstoffen und dem damit vorhandenen „Gleichgewichtszustand“ bleibt die Feststoffbilanz im Tideablauf ausgeglichen. Die hohen Konzentrationen sind eher auf die Remobilisierung des vorhandenen Materials im Bereich des hochfrequenten Peilhorizontes zurückzuführen. Die hydrodynamisch bedingten Austauschvorgänge finden zwischen dem äußeren Hafenbereich und der Ems statt.

Zum Eintritt des Thw beruhigt sich die Situation in der Ems und zeitverzögert auch im Vor- und Außenhafen (Messung 5 und 6 in Abb. 90).

• Ebbestromverhältnisse

Die bei dem Nipptidefall vom 26. Juli 2000 gemessenen Trübungen sind in Abb. 91 aufgetragen. Die Schwebstofffrachten erhöhen sich in der Ems nach der Flutstromkenterung kontinuierlich bis zum Tideniedrigwasser (Abb. 91). Dem Vertikalgradienten der Ebbeströmungen entsprechend und aufgrund der unterschiedlichen Wassertiefen, stellen sich oberhalb der Hafeneinfahrt höhere Konzentrationen ein als unterhalb davon.

Im Vor- und Außenhafen wurden bis Tidehalbwasser (Abb. 91, Messung 3) an allen Positionen relativ geringe Schwebstoffkonzentrationen von $C_S = 200$ bis 300 mg/l festgestellt.

In der zweiten Ebbestromphase führen die Strömungs- und Dichteeffekte (vgl. Abb. 87) zu den Austauschvorgängen zwischen der Ems und dem angrenzenden Hafenbereich. In den oberen Wasserschichten (Position 4, Abb. 91) werden zunehmend Feststoffe in den Hafen eingetragen. Mit den zur Ems gerichteten Dichteströmungen in den tieferen Wasserschichten findet der Rücktransport zur Ems statt (Position 3, Abb. 91). Besonders ausgeprägt sind die entgege-

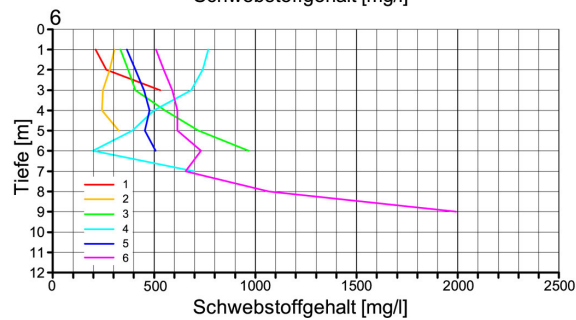
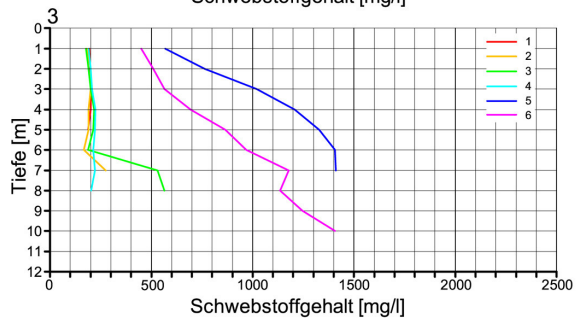
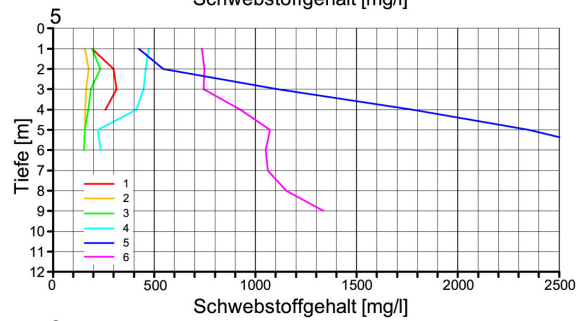
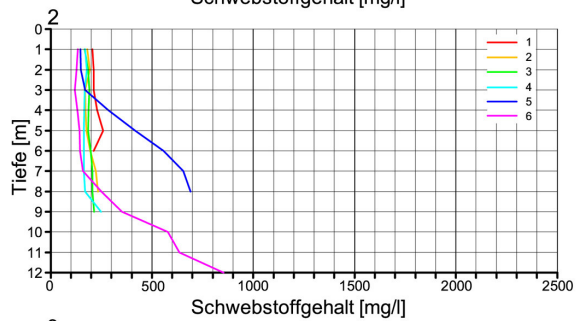
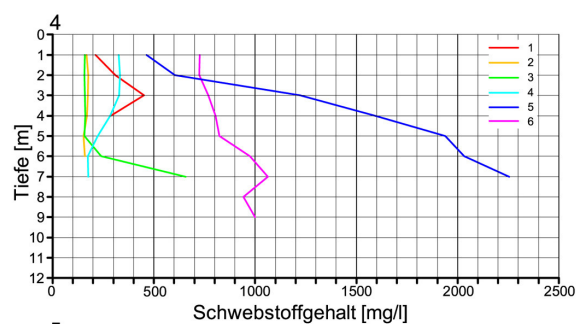
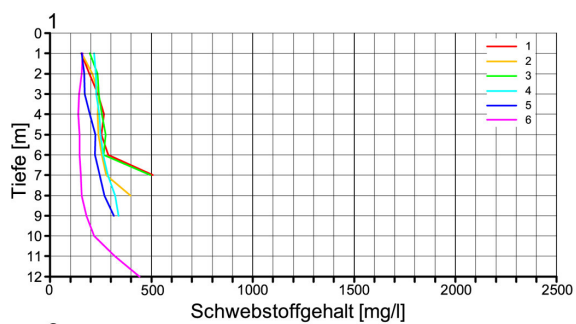
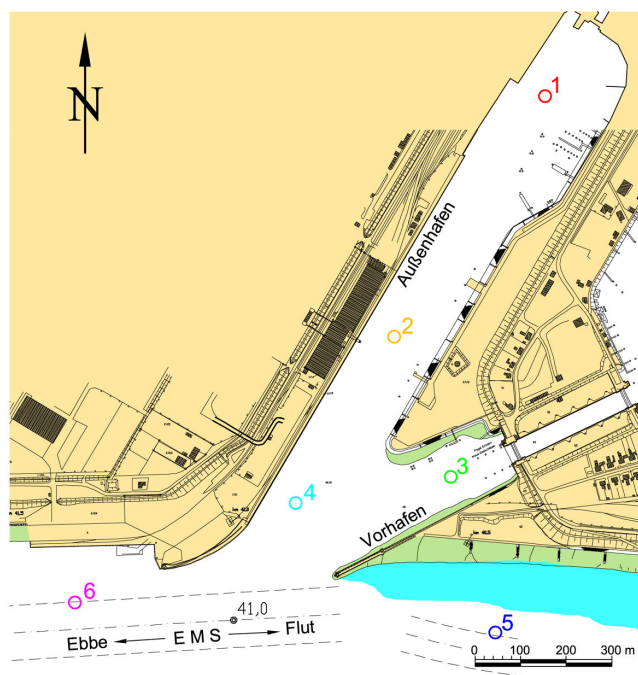
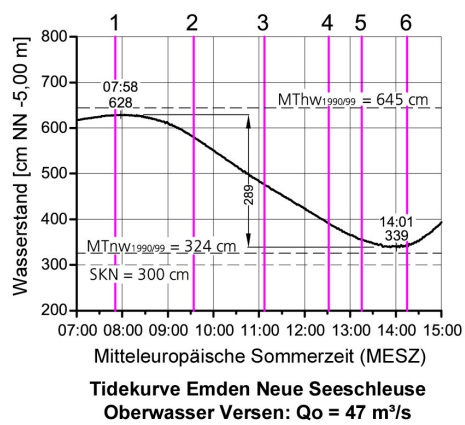


Abb. 91: Schwebstoffe im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens, Ebbemessung am 26.07.2000

setzt verlaufenden Schwebstoffverteilungen kurz nach Tideniedrigwasser (Abb. 91, Messung 6). Im inneren Außenhafen (Position 1 und 2) sind die hydrodynamischen Vorgänge offenbar von untergeordneter Bedeutung. Die relativ hohen Feststoffkonzentrationen sind dort auf die sehr geringen Sinkgeschwindigkeiten der Partikel zurückzuführen.

6 Messungen in Brunsbüttel

Die am rechten Elbeufer gelegenen Vorhäfen des Nord-Ostsee-Kanals sind in Abb. 92 dargestellt. Im Bereich der Hafenzufahrt und unterhalb davon werden die Wassertiefen in der Elbe außerhalb der rechten Fahrrinnenbegrenzung deutlich flacher. Am oberen Ende des Stromabschnitts zeigt die Sohle im Fahrwasser Riffelstrukturen.

Die Lage der in der Elbe gefahrenen Querprofile sind ebenfalls in Abb. 92 dargestellt.

6.1 Strömungen in der Elbe

Abhängig vom Schiffsverkehr und den Wetterverhältnissen betrug der Zeitbedarf für eine Messung der drei Profile rd. 40 bis 50 Minuten. Die mit der ADCP-Sonde ermittelten Strömungen wurden nach Stärke und Richtung in Meterabständen ausgewertet. In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse in 2 m-Abständen dargestellt worden.

• Flutströmungen

Am 6. Juli 2005 wurden die Messungen bei mittleren Tideverhältnissen ($T_{hb} = 289$ cm) und einem Binnenabfluss am Pegel Neu Darchau von $Q_0 = 276$ m³/s durchgeführt (Abb. 93). Es herrschten südöstliche Winde der Stärke 4-5 Bft (7-8 m/s). Mit den ersten beiden Messungen in Abb. 93 ist die Ebbestromkenterung nachvollziehbar. Zu Beginn (Messung 1) wurden in den oberen Wasserschichten noch Ebbestromgeschwindigkeiten von $v_e > 100$ cm/s gemessen. Im Sohlenbereich setzte gleichzeitig die Kenterphase ein. Während des zweiten Umlaufs, etwa eine Stunde nach T_{nw} , hatte sich die Kenterung bis zur 1,85 m Tiefenzelle durchgesetzt. Während der Kenterphase (Messungen 1 und 2 in Abb. 93) sind in der Einfahrt zum Neuen Vorhafen noch die ebbestromorientierten Strömungsvorgänge zu beobachten. In der ersten Flutstromphase, während des steilen Anstiegs der Tidekurve, kommt es zur raschen Beschleunigung der Flutströmungen. Beim 4. Umlauf wurden Geschwindigkeiten bis zu $v_{f \max} > 175$ cm/s ermittelt (Abb. 94, Messung 4). Mit sich abflachendem Flutast der Tidekurve werden die Strömungen kontinuierlich schwächer (Abb. 94). Gleichzeitig verstärken sich die flutstromorientierten Strömungs- und Dichteeffekte im Vorhafen.

Die für die drei Querprofile in den Fahrwasserbereichen gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten sind für die ersten 5 Messungen in Abb. 95 dargestellt. Die ersten Vertikalprofile zeigen die ausklingende Ebbestromphase. Beim ersten Umlauf betrugen die Strömungsgeschwindigkeiten kurz vor T_{nw} an der Oberfläche noch $v_e \approx 0,9$ m/s (Profil 2). Bei dem letzten Profil 1 waren es noch $v_e \approx 0,5$ m/s. Von Bedeutung ist es, wie sich die Flutströmung zunächst an der Sohle durchsetzt. Kurz nach der Ebbestromkenterung wurde im mittleren Profil 2 sohlennah bereits maximal $v_f = 50$ cm/s ermittelt. Im Profil 1 betrug der Größtwert bei dem gleichen Umlauf bereits $v_{f \max} \approx 75$ cm/s (Abb. 95).

Wie bei den anderen Tideflüssen verlagert sich der Maximalwert der Flutströmungen mit fortschreitender Flutstromdauer von unten nach oben. Außerdem sind die Vertikalgradienten im oberen Brackwassergebiet der Tideelbe nicht so stark ausgeprägt wie in den anderen Revieren.

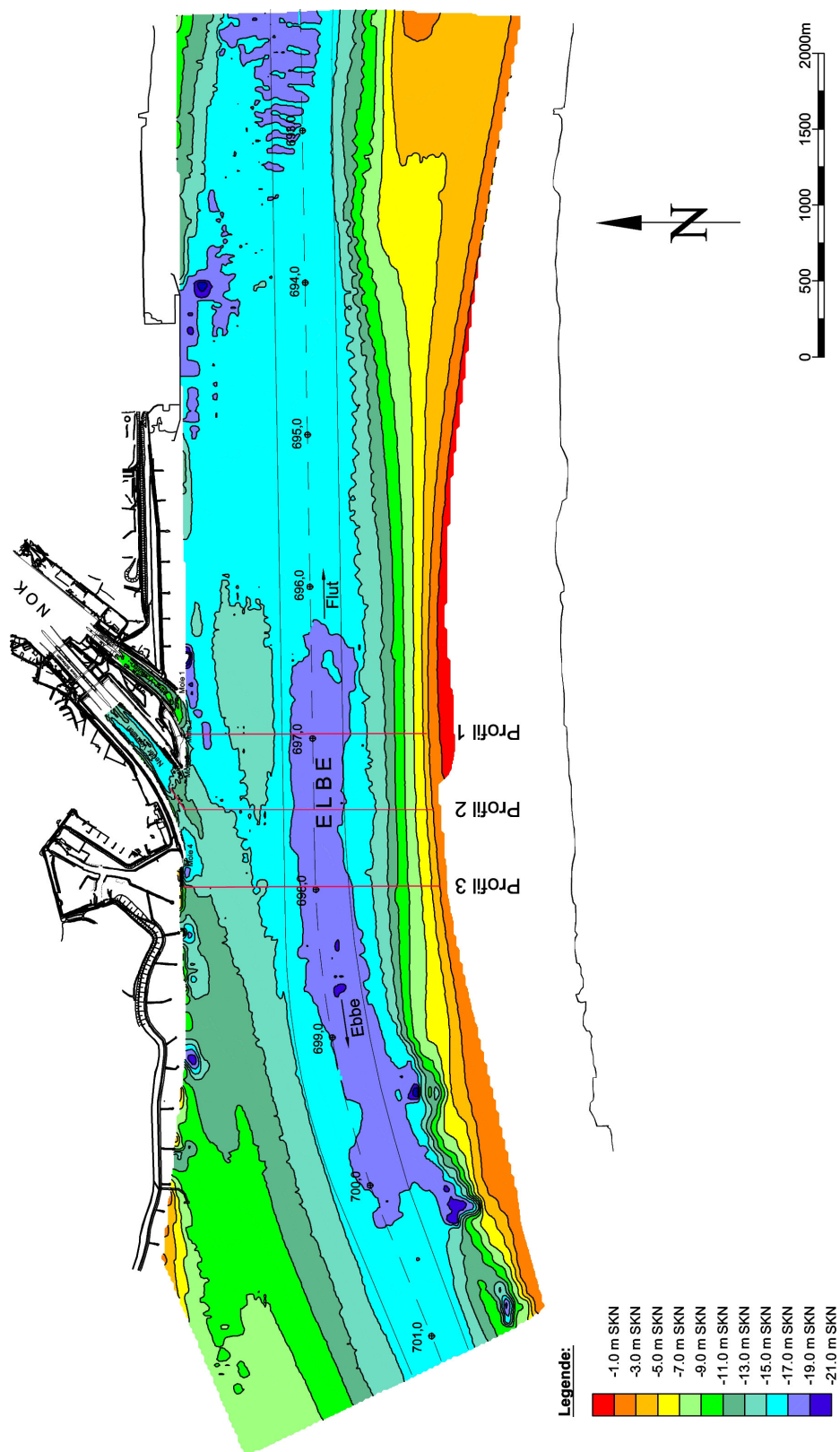


Abb. 92: Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal in Brunsbüttel, Peilung vom Mai/August 2005 (WSA Cuxhaven, WSA Brunsbüttel)

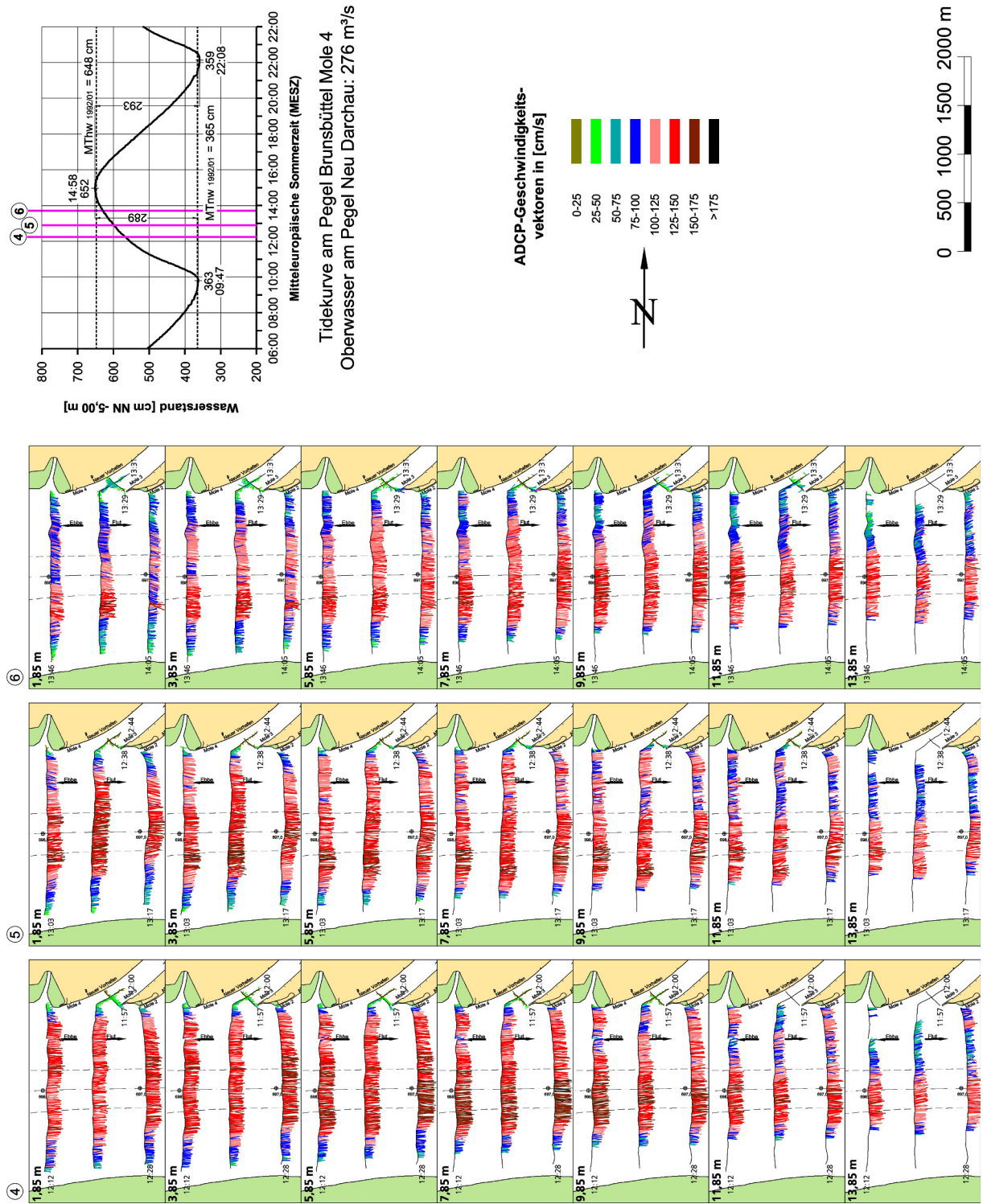


Abb. 94: Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 06.07.2005, zweite Flutphase

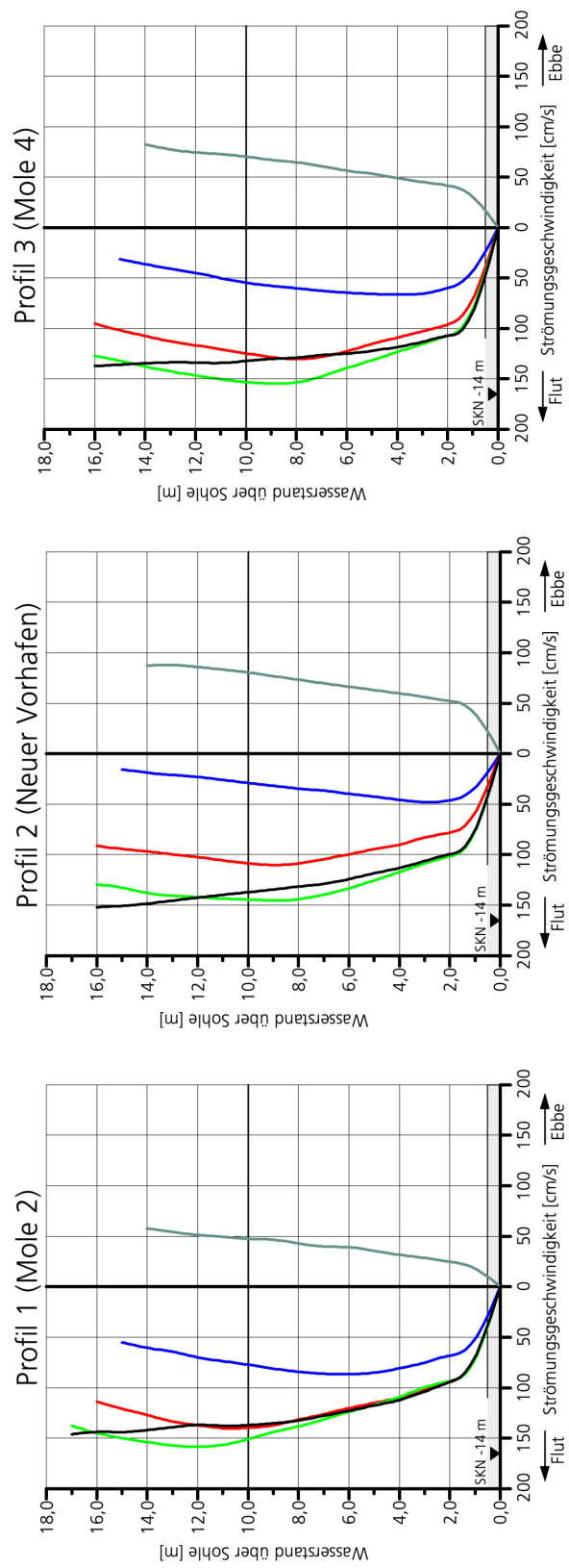
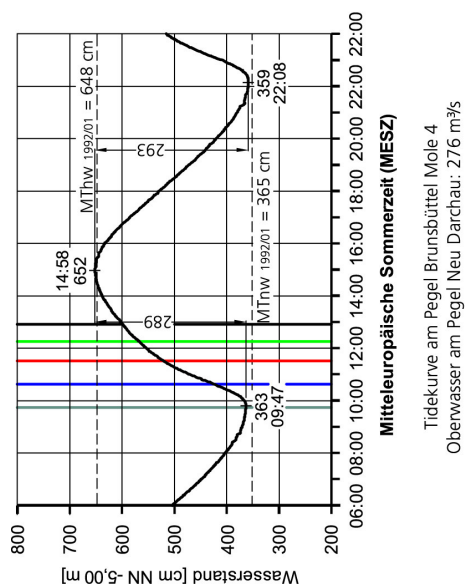


Abb. 95: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 06.07.2005 (Lage der Profile s. Abb. 92)

Die stärksten mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrwasser wurden -ebenso wie an der Weser und Ems- in der dritten Stunde nach Tideniedrigwasser mit $v_{fm} \approx 150$ cm/s ermittelt.

Die letzten drei Umläufe sind in Abb. 96 dargestellt. Die Flutstromkenterung setzte zuerst im flacheren Wasser des rechten, nördlichen Strombereichs außerhalb der Fahrrinne ein. Die letzte Messung (9) dokumentiert, dass der Kentervorgang auch 90 Minuten nach dem Eintritt des Thw noch nicht abgeschlossen war.

Die kontinuierliche Abnahme der Flutstromintensitäten wird mit Abb. 97 verdeutlicht. Bis zum Ende der Flutstromphase sind die höheren Geschwindigkeiten dichtebedingt in größeren Wassertiefen anzutreffen. Die Ebbeströmung setzte sich erst rd. 1,5 Stunden nach Thw an der Wasseroberfläche im oberstromigen Profil 1 durch.

Im März 2007 wurden die Messungen in Brunsbüttel zum Vergleich bei erhöhtem Oberwasser der Elbe durchgeführt (Abb. 98). Der mittlere Abfluss betrug $MQ_o = 1008$ m³/s und lag damit deutlich über dem langjährigen Mittelwert von $MQ_{o1941/2004} = 703$ m³/s. Der höchste Binnenabfluss wurde in Neu Darchau am 11. März mit $Q_o = 1270$ m³/s und der niedrigste am 22. März mit $Q_o = 827$ m³/s festgestellt. Der Pegel Neu Darchau liegt ca. 47 km oberhalb der Tidegrenze in Geesthacht und rd. 160 km oberhalb von Brunsbüttelkoog.

Am 20. März 2007 betrug der Tidehub am Pegel Brunsbüttel Mole 4 $Th_b = 324$ cm bei einem Oberwasser in Neu Darchau von $Q_o = 872$ m³/s (Abb. 99). Das Hochwasser vom 11. März 2007 mit $Q_{o_{max}} = 1270$ m³/s war in Neu Darchau bereits deutlich zurückgegangen. Die hydrologischen Randbedingungen in Brunsbüttel waren am 20. März noch von den höheren Abflüssen beeinflusst. Die gegenüber den langjährigen Mittelwerten erhöhten Wasserstände waren durch leichten Windstau geprägt.

Mit dem ersten Umlauf wurde die Ebbestromkenterung erfasst. In den unteren beiden Profilen sind nach Tideniedrigwasser noch schwache Ebbeströmungen gemessen worden (Abb. 99, Messung 1).

Trotz des erhöhten Oberwassers traten bei der Messung vom März 2007 stärkere Flutstromgeschwindigkeiten auf als bei der Messung vom Juli 2005 (vgl. Abb. 99 und 100 mit Abb. 93 und 94). Das liegt sicher an dem mit 324 cm um 35 cm höheren Tidehub und den damit verbundenen größeren Tidewassermengen. Es fällt auf, dass die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten erst in der späteren Flutstromphase gemessen wurden (Messungen 3 bis 5 in Abb. 99 und 100). Das ist auf die Oberwasserbedingungen vom März 2007 in der Elbe zurückzuführen und das bei Springtiden erst zur späten Flutstromphase deutliche Vertikalgradienten der Salzgehalte auftreten.

Die Messungen 7 und 8 in Abb. 101 zeigen wie sich die Ebbeströmungen von oben nach unten durchsetzt. Bemerkenswert ist die Beobachtung, dass die Kenterung im Fahrwasser erst etwa 1,5 Stunden nach Thw einsetzte (Messung 7, mittleres Profil). Sie hatte sich dann allerdings rasch bis zur Sohle durchgesetzt (Messung 8).

Die für den Fahrwasserquerschnitt gemittelten Geschwindigkeiten in Abb. 102 zeigen die Kenterphase der Ebbeströmungen. Anschließend ist die rasche Zunahme der Strömungsgeschwindigkei-

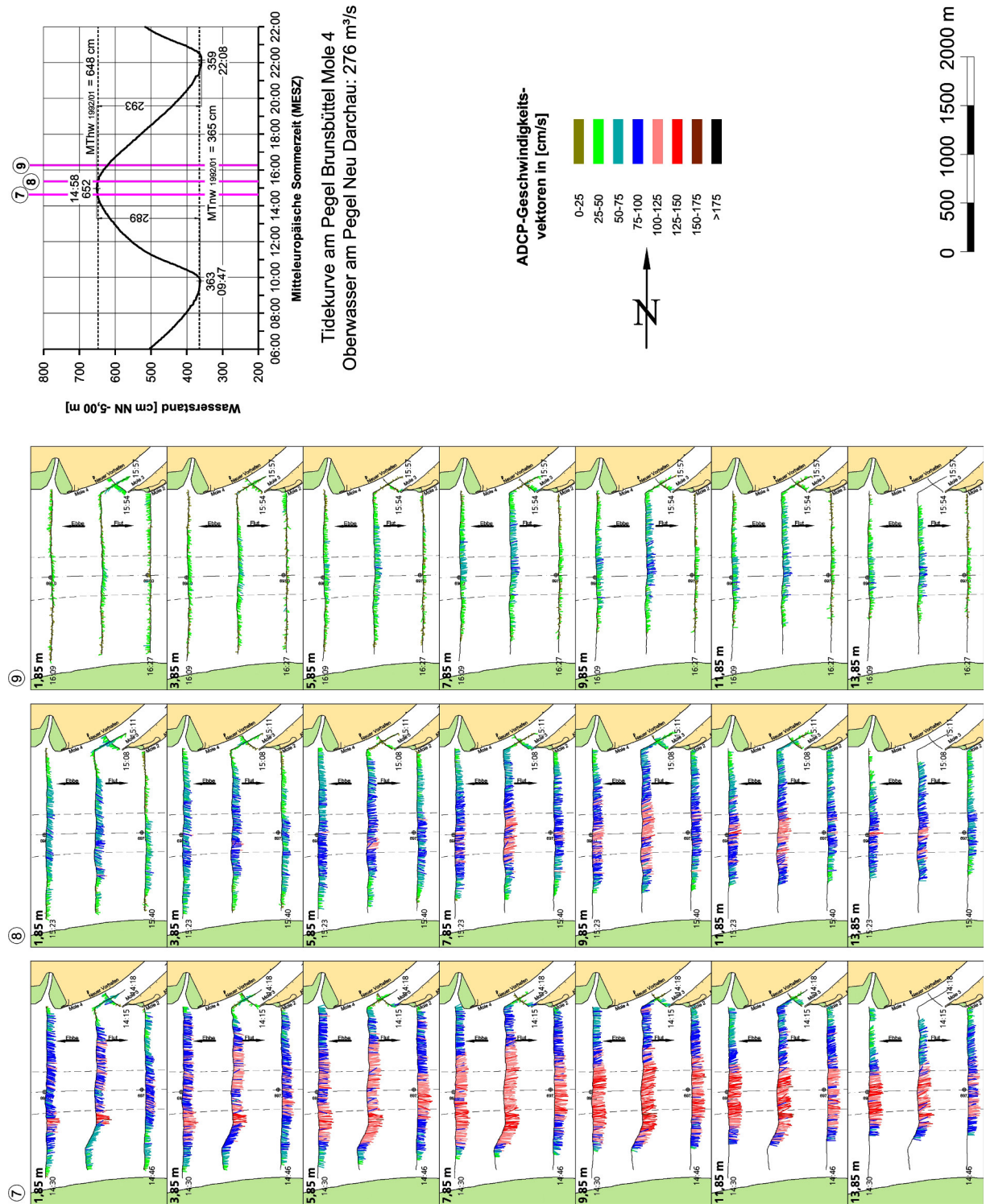


Abb. 96: Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 06.07.2005, letzte Flutphase

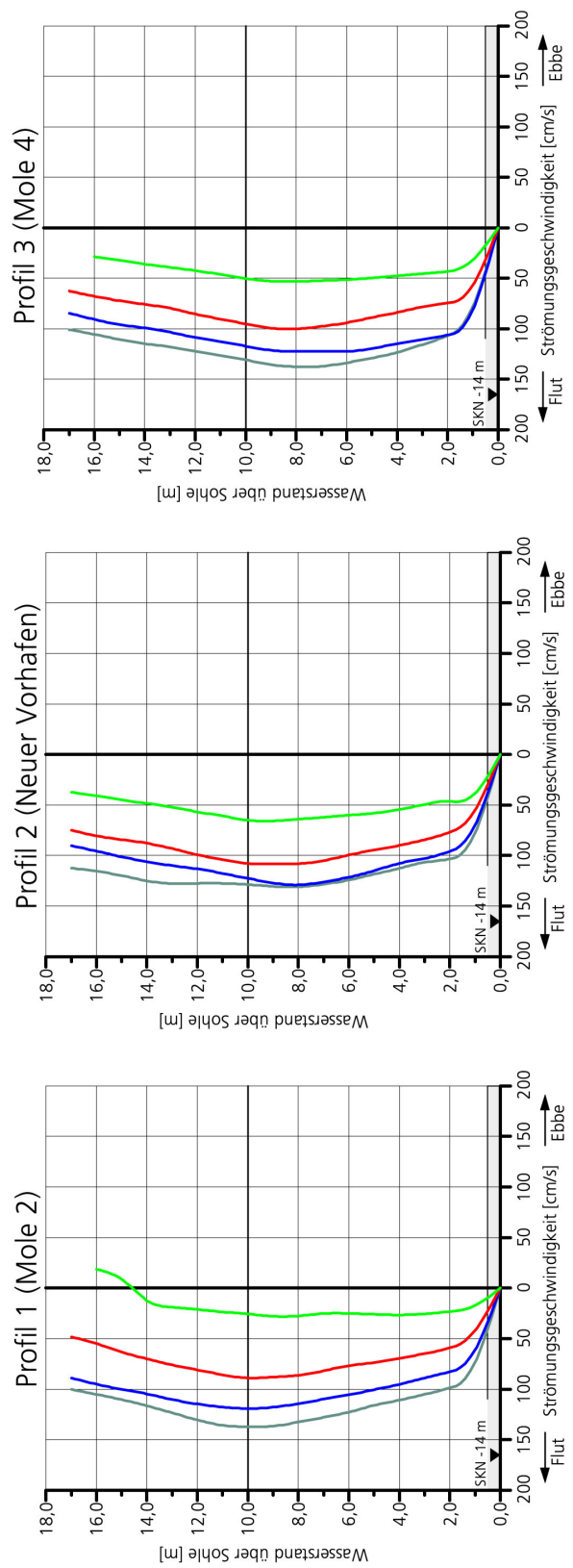
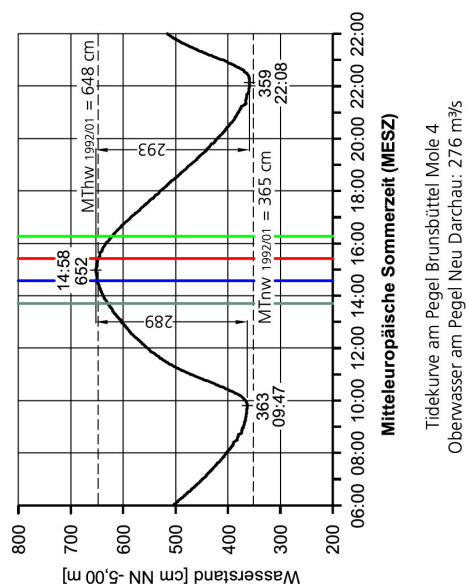


Abb. 97: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 06.07.2005 (Lage der Profile s. Abb. 92)

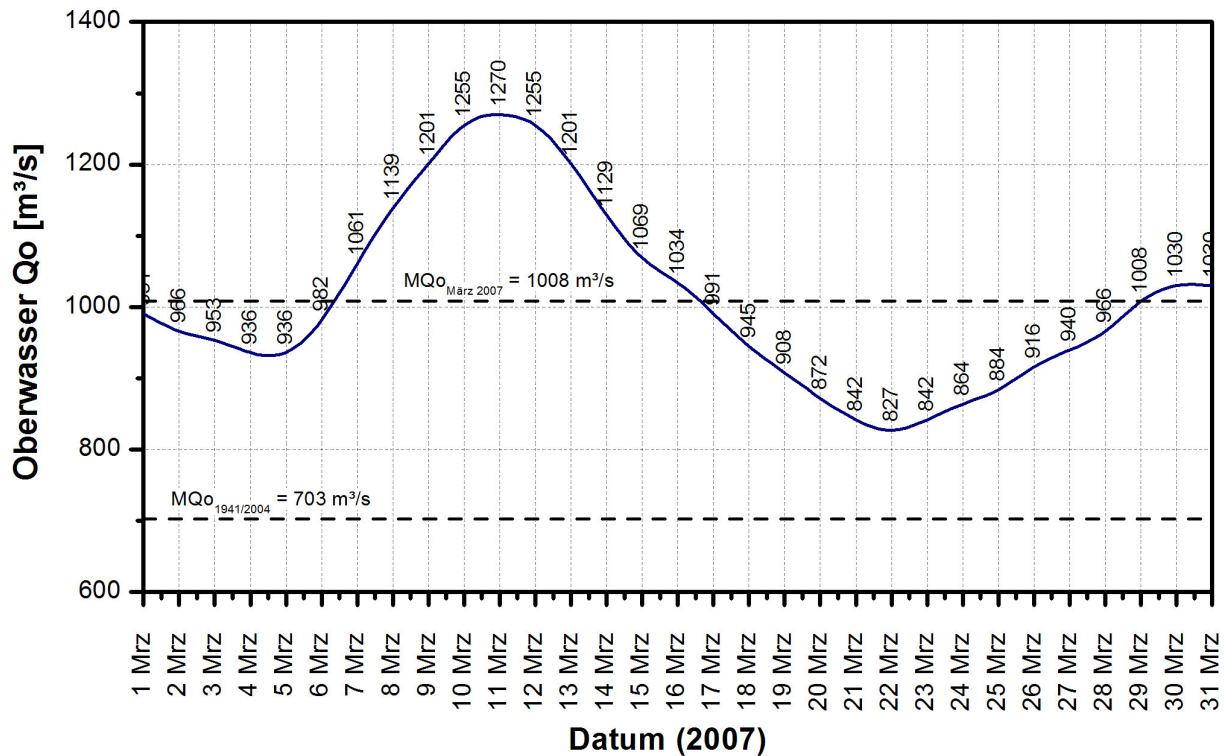


Abb. 98: Oberwasserganglinie am Pegel Neu Darchau im März 2007

ten beim steilen Anstieg des Flutastes der Tidekurve nachzuvollziehen. Gegenüber der Vormessung haben die Geschwindigkeitsverteilungen einen mehr parabolischen Verlauf (vgl. Abb. 95). Wie vorstehend erläutert ist das auf die in dieser Tidephase bei niedrigem Oberwasser stärkeren vertikalen Salzgradienten in der Elbe zurückzuführen.

Bemerkenswert sind die Veränderungen der Vertikalprofile in Abb. 102 und Abb. 103. In der ersten Flutstromphase ist die Verteilung mehr parabolisch mit den größten Werten an der Wasseroberfläche. Mit zunehmender Flutstromdauer verursacht das von See eindringende Salzwasser eine Verschiebung der Maximalgeschwindigkeiten in tiefere Wasserschichten. Gleichzeitig setzt sich nach und nach das leichtere Oberwasser in den höheren Bereichen durch. Dieser Vorgang schreitet bis zur Strömungsumkehr fort, die sich von oben nach unten vollzieht.

• Ebbeströmungen

Am 29. Juni 2005 betrug der Nipptidefall in Brunsbüttel 256 cm und der Abfluss in Neu Darchau $Q_o = 305 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 104). Während der ADCP-Messungen herrschte recht ruhiges Wetter.

Mit Abb. 104 wird die ausklingende Flutstromphase bis zur Kenterung dargestellt. Beim 4. Umlauf wurden in den oberen Tiefenzellen bereits Ebbestromgeschwindigkeiten bis über 75 cm/s registriert (Abb. 105). An der Fahrwassersohle war die Kenterung knapp 2 Stunden nach Tidehochwasser gerade abgeschlossen. Bis zur 6. Messung in der vierten Stunde nach Thw wurden die stärksten Ebbestromgeschwindigkeiten erreicht.

Im übrigen hat sich auch bei den Flutmessungen in der Elbe gezeigt, dass sich die Flutstromkenterung gegenüber dem Eintritt des Scheitelwasserstands mehr verspätet als die Ebbestrom-

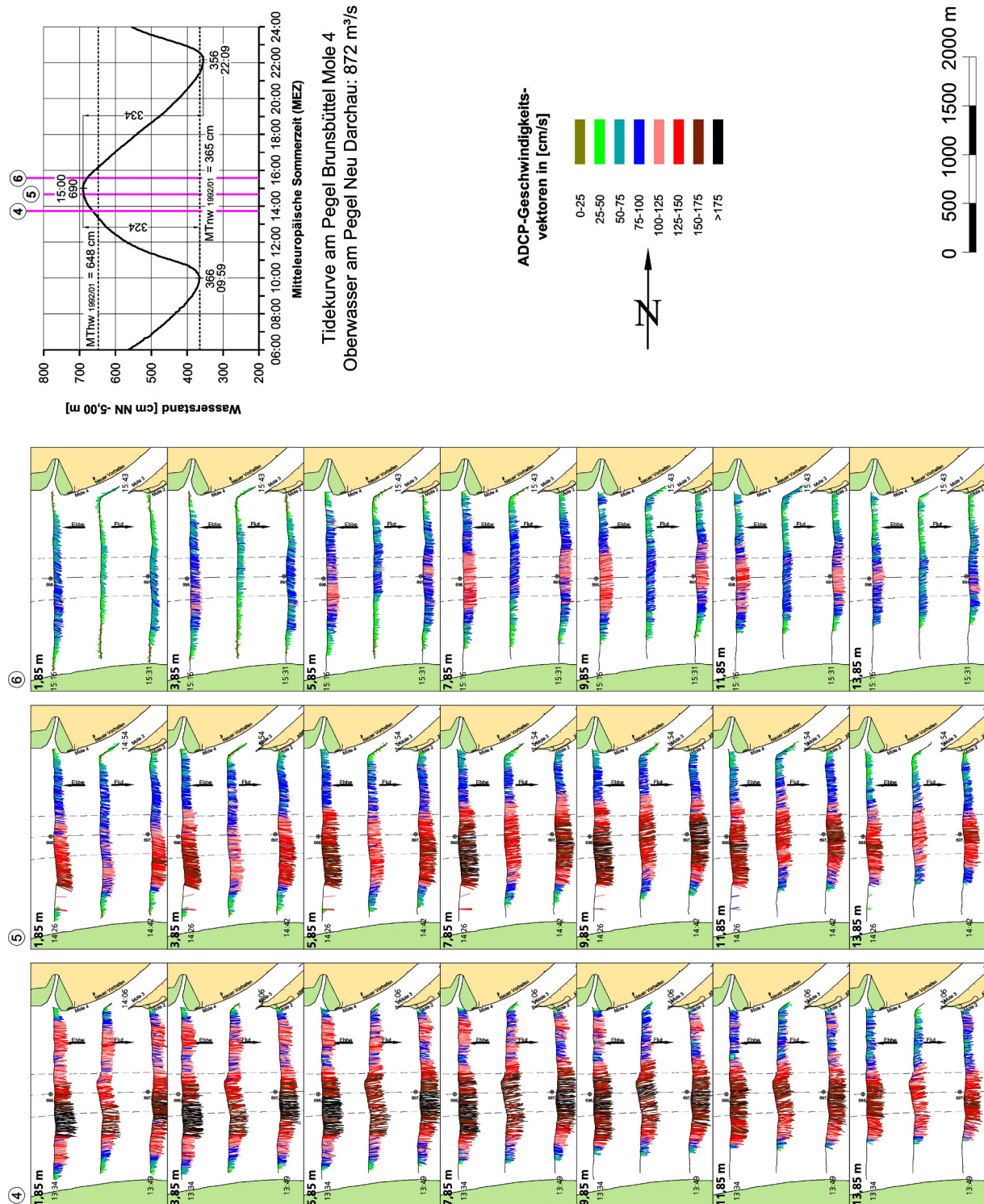
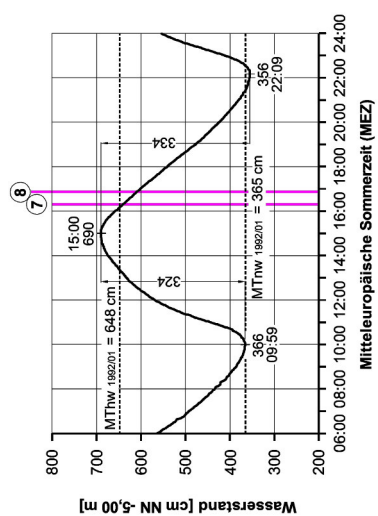


Abb. 100: Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 20.03.2007, zweite Flutphase



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 872 m³/s

ADCP-Geschwindigkeits-
vektoren in [cm/s]

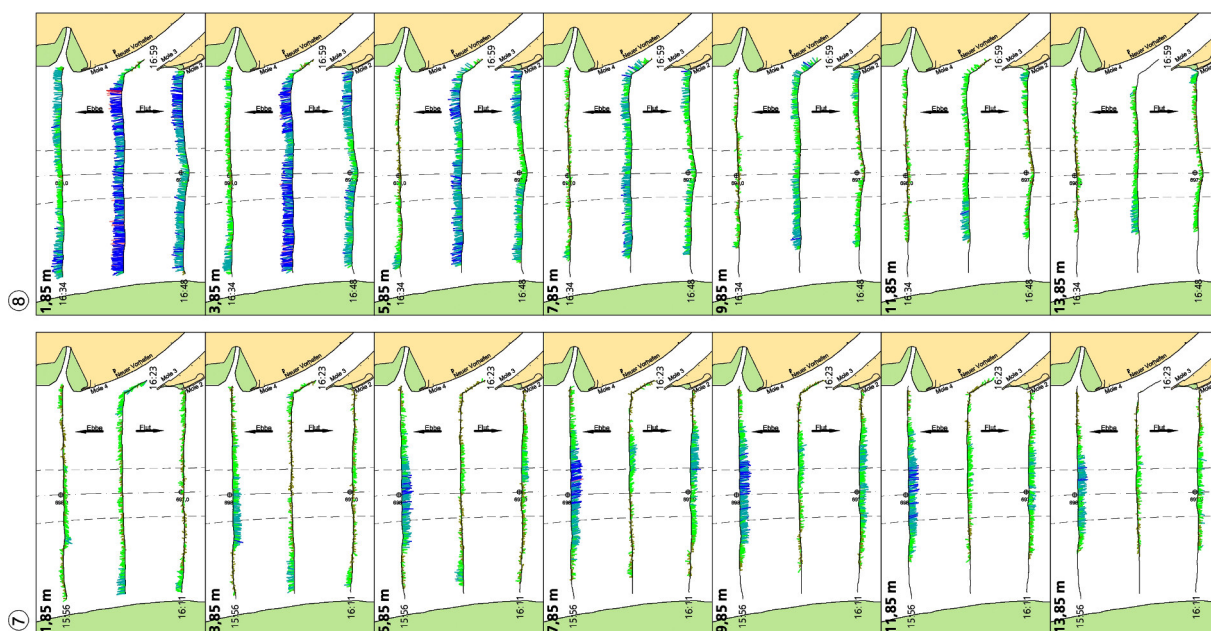
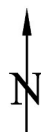


Abb. 101: Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 20.03.2007, letzte Flutphase

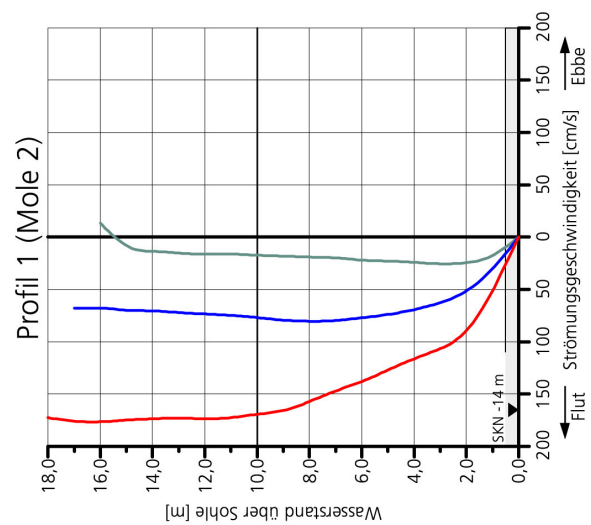
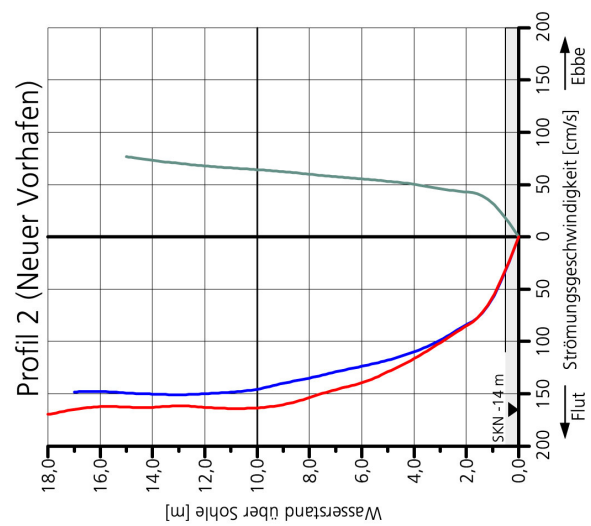
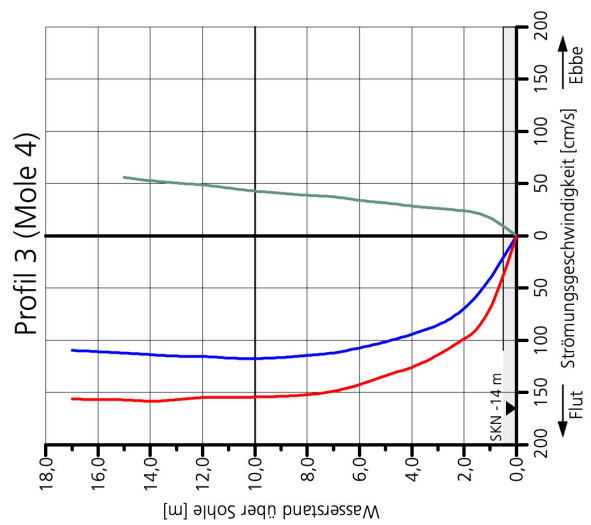
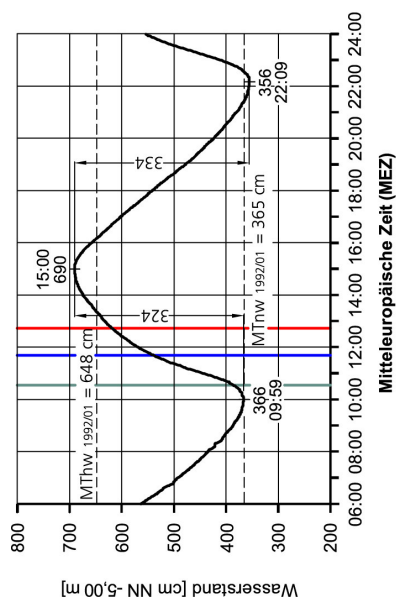
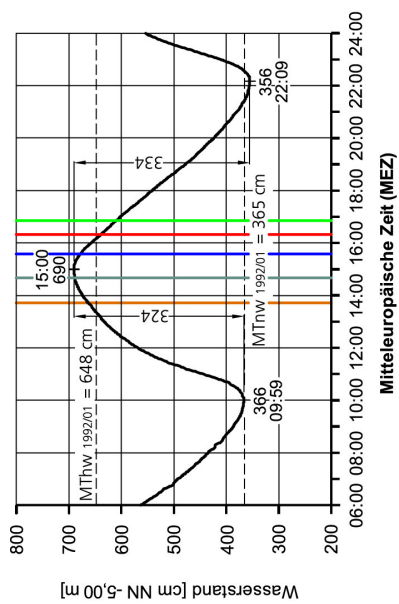


Abb. 102: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 20.03.2007 (Lage der Profile s. Abb. 92)



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 872 m³/s

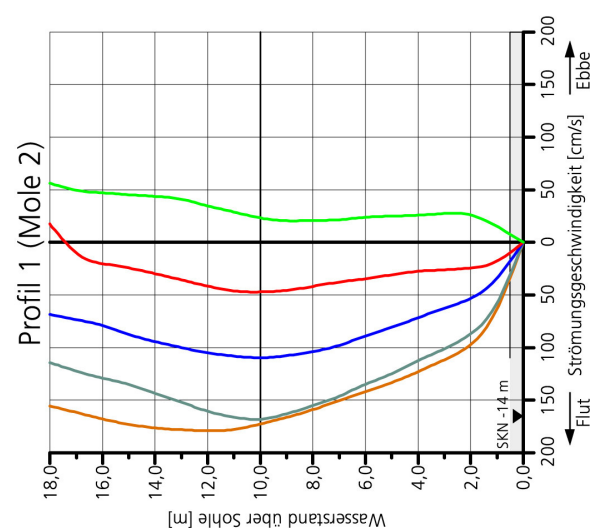
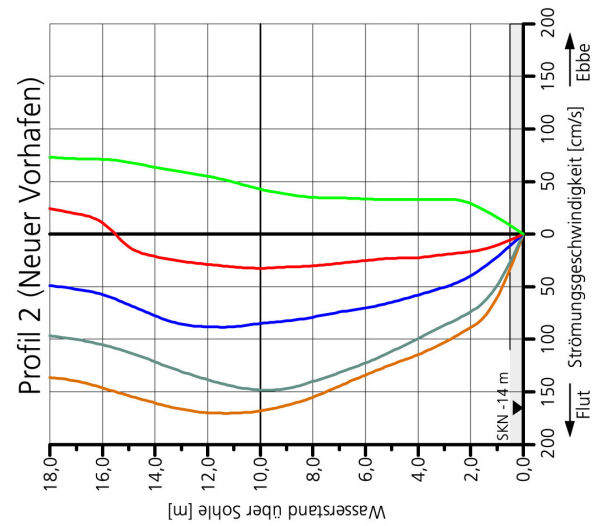
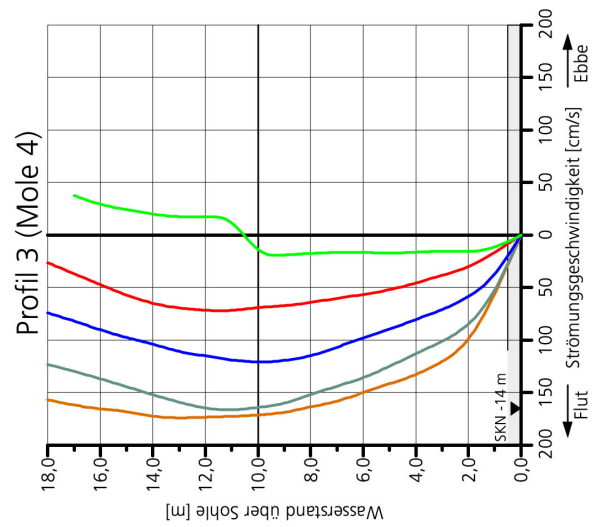


Abb. 103: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 20.03.2007 (Lage der Profile s. Abb. 93)

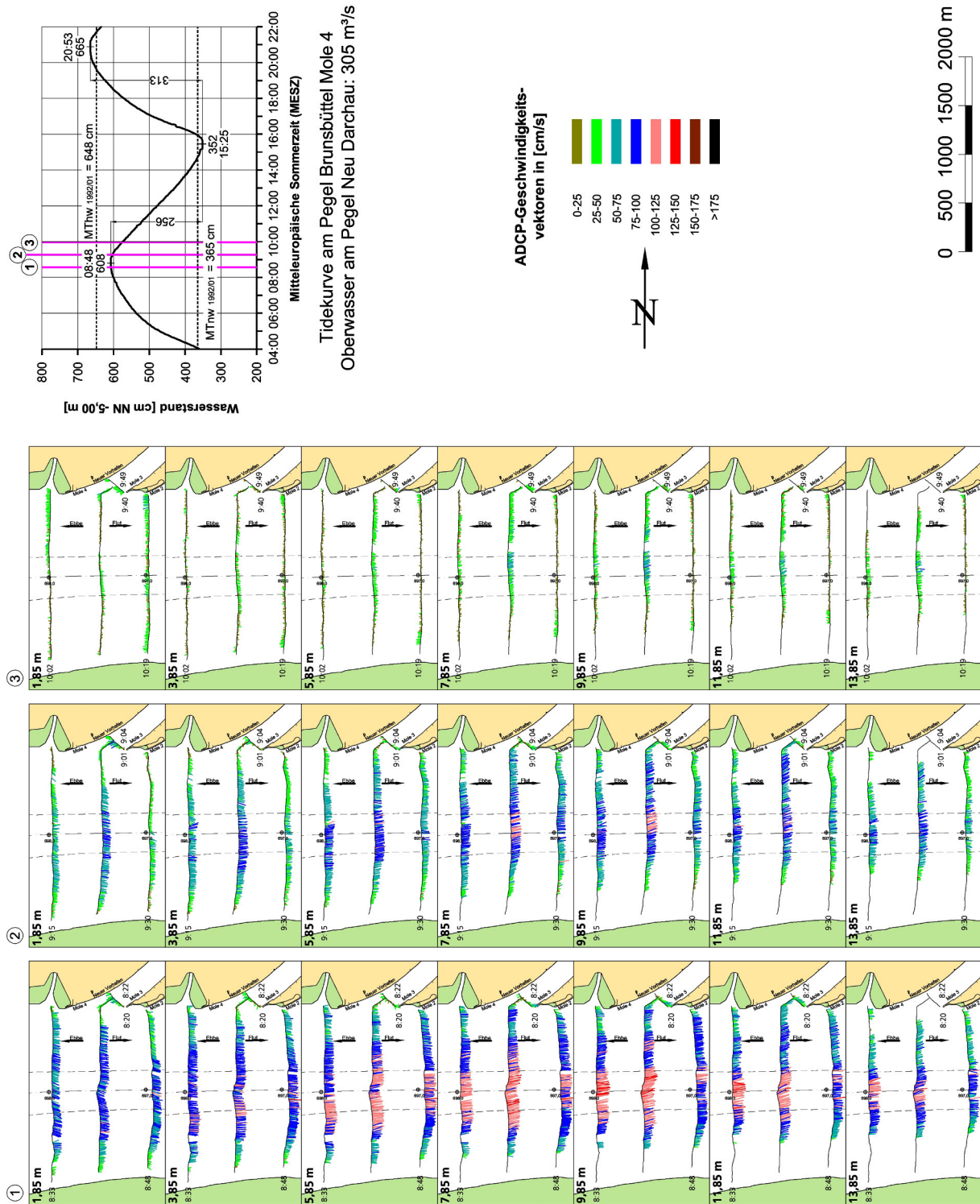


Abb. 104: Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 29.06.2005, erste Ebbephase

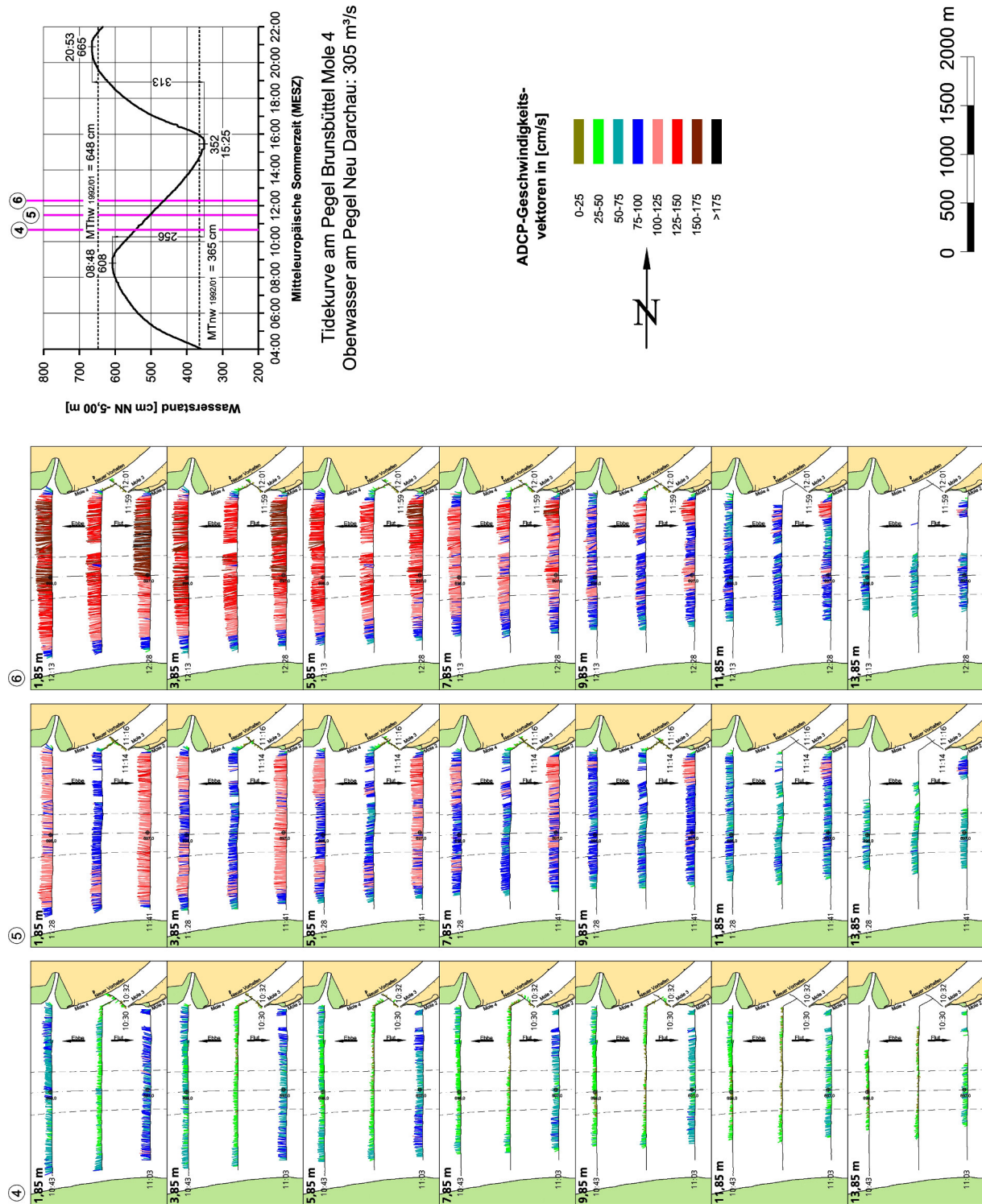


Abb. 105: Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 29.06.2005, zweite Ebbephase

kenterung (vgl. Abb. 93, 96 sowie Abb. 99 und 101). In Brackwasserbereichen von Tideflüssen ist es außerdem so, dass sich die Ebbeströmungen im flacheren Wasser außerhalb der Fahrrinne eher durchsetzen (Abb. 104, 3. Messung). Die gleichen Vorgänge sind in den Wattengebieten der Außenweser in Bremerhaven zu beobachten.

Die für den Fahrwasserbereich in Abb. 104 und 105 aufgetragenen Strömungsvektoren sind als mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in Abb. 106 dargestellt. Die Vertikalverteilungen der Flutströmungen sind typisch für die späte Flutstromphase bei niedrigem Oberwasser in Neu Darchau (vgl. z.B. Abb. 97). Auch im oberen Brackwasserbereich wird das Transportvermögen der Flutströmungen durch Brackwassereffekte erhöht. Die Einflüsse sind in Emden und Bremerhaven an der Ems und Weser jedoch stärker ausgeprägt.

Mit Abb. 106 wird veranschaulicht, wie sich die Flutstromkenterung im Fahrwasser von oben nach unten durchsetzt. Außerdem sind nach abgeschlossener Strömungsumkehr die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten in den oberen Wasserschichten anzutreffen.

Die stärksten Ebbeströmungen wurden nach Tidehalbwasser beobachtet (Abb. 105 und 107, Messungen 6 und 7). Dabei fällt auf, dass die Ebbestromgeschwindigkeiten, besonders in den oberen Wasserschichten nördlich des Fahrwassers zum rechten Ufer stärker sind als in dem sich erweiternden Querschnitt links bzw. südlich des Fahrwassers. Bei etwa gleich bleibender Verteilung in den Querschnitten werden die Strömungsintensitäten in der zweiten Stunde vor Tideniedrigwasser insgesamt etwas schwächer (Messung 8 in Abb. 107).

Die Strömungsvorgänge in der letzten Ebbephase bis zur einsetzenden Flutströmung sind mit Abb. 108 nachvollziehbar. Die Strömungsintensitäten im Fahrwasser werden erst nach der 10. Messung, die bei Tideniedrigwasser beendet wurde, deutlich schwächer. Knapp 1 Stunde nach Tnw begann in den tieferen Wasserschichten die Kenterung. Nach 1,5 Stunden wurden auch an der Oberfläche Flutströmungen gemessen (Abb. 108, 12. Messung).

Im Fahrwasser bleiben die Ebbestromgeschwindigkeiten auch in der fortgeschrittenen Tidephase noch annähernd gleich. Das wird mit den berechneten Vertikalprofilen deutlich (Abb. 109). Bei der 7. und 8. Messung sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten etwa gleich stark. Maximal wurden an der Oberfläche $v_e \approx 150 \text{ cm/s}$ erreicht.

Bis kurz vor Tnw betrugen die Ebbeströmungen im Fahrwasser an der Oberfläche noch Werte von $v_e \approx 1 \text{ m/s}$. Nach 16.00 Uhr setzte im oberen Profil 1 die Kenterung ein. In der folgenden ersten Flutstromphase wurden mit den Strömungsprofilen, die brackwassergeprägten Vertikalgradienten ermittelt.

Die Ebbestrommessung am 13. März 2007 wurde bei hohem Oberwasser zwei Tage nach Durchgang des Höchstabflusses in Neu Darchau durchgeführt (Abb. 98). Der Tidefall betrug lediglich 223 cm (Abb. 110). Während der Messungen wehte schwacher Wind aus Nordwest mit der Stärke 3 Bft (4-5 m/s).

Mit den Messungen wurde kurz nach Tidehochwasser während der letzten Flutstromphase begonnen (Messung 1 in Abb. 110). Mit dem zweiten Umlauf ist die anschließende Kenterung erfasst worden. Etwa 2 Stunden nach Tidehochwasser wurden im Profil 1 Ebbestromgeschwin-

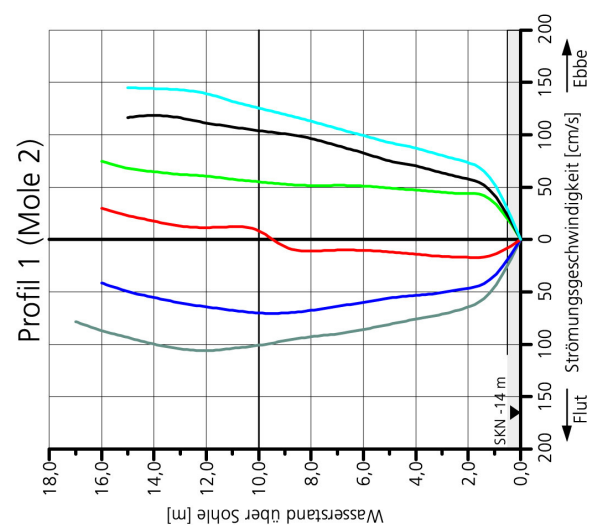
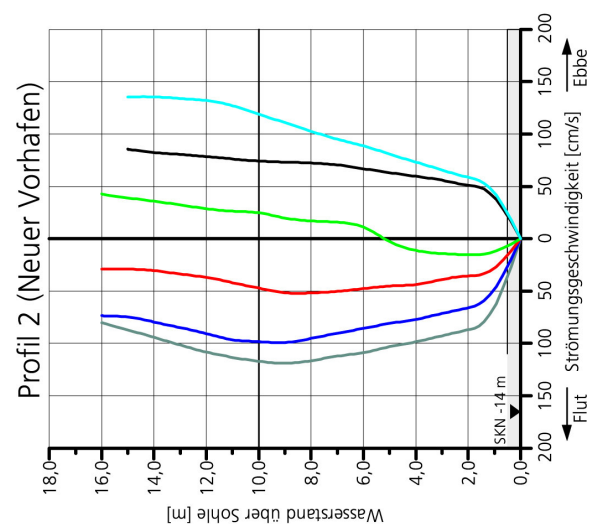
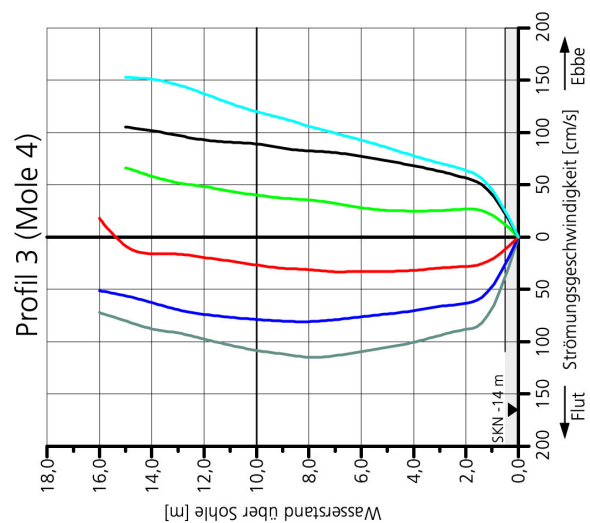
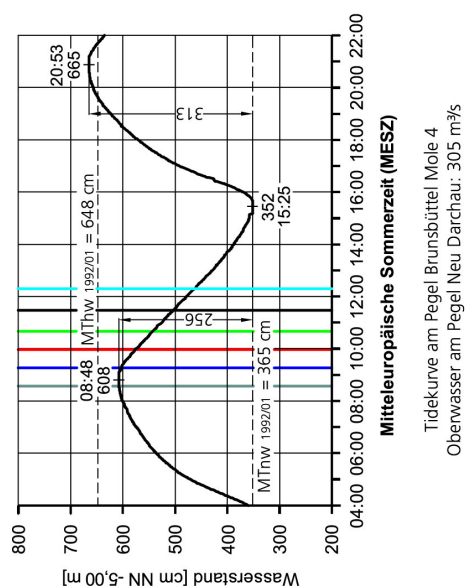
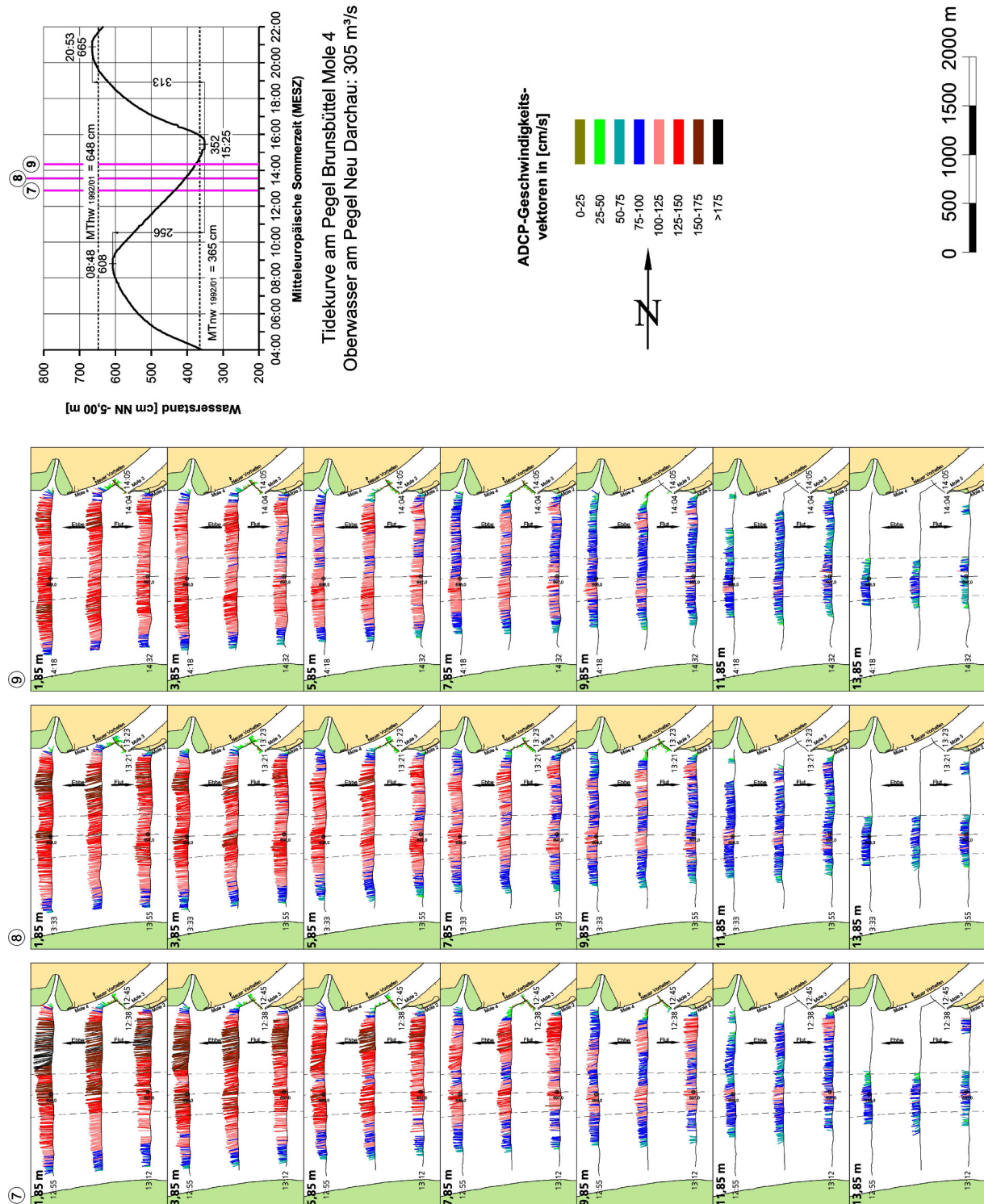


Abb. 106: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 29.06.2005 (Lage der Profile s. Abb. 92)



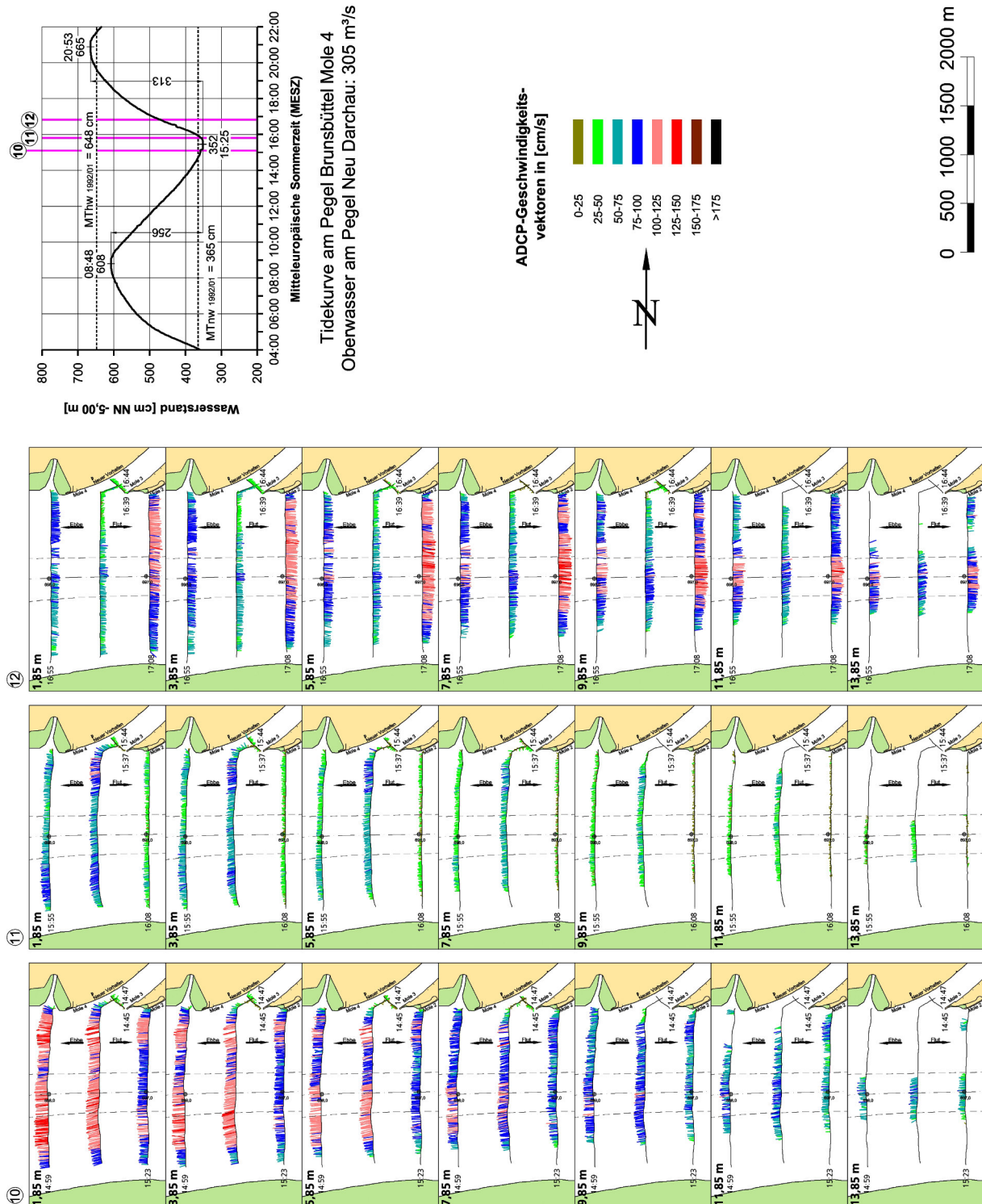


Abb. 108: Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 29.06.2005, letzte Ebbephase

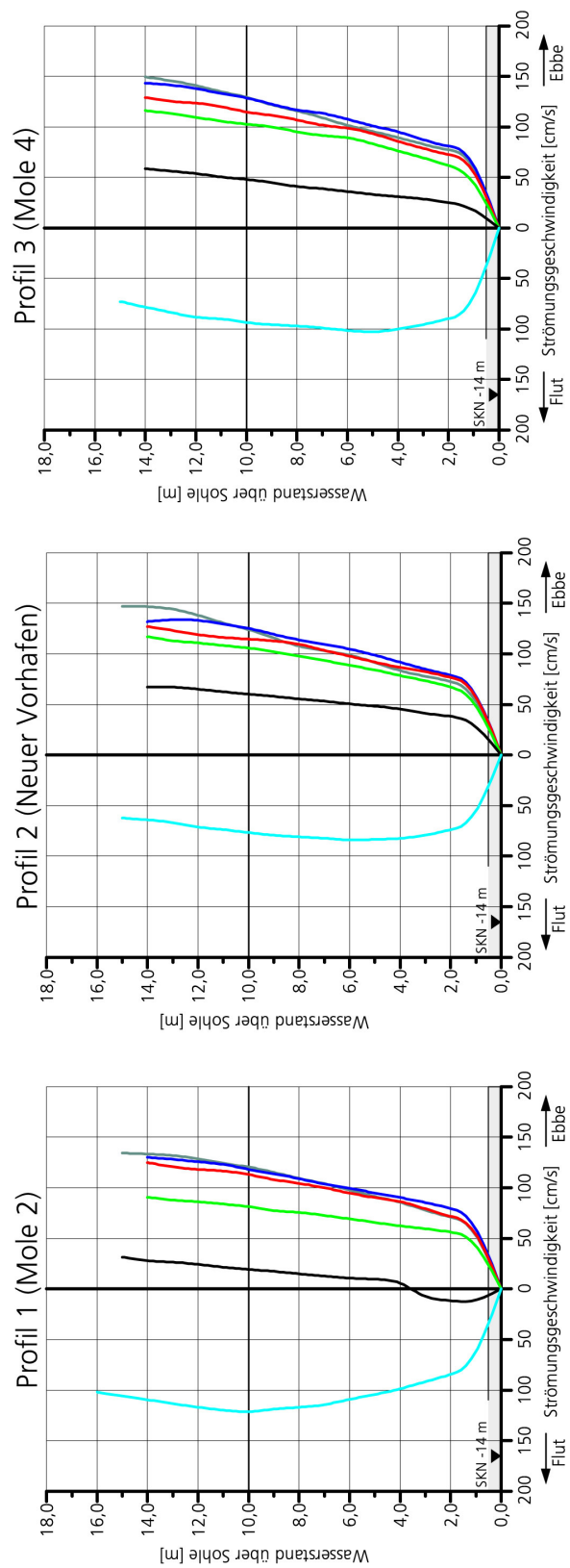
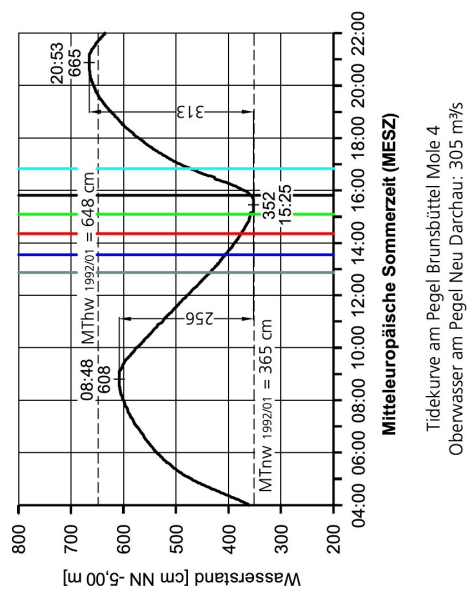


Abb. 109: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 29.06.2005 (Lage der Profile s. Abb. 92)

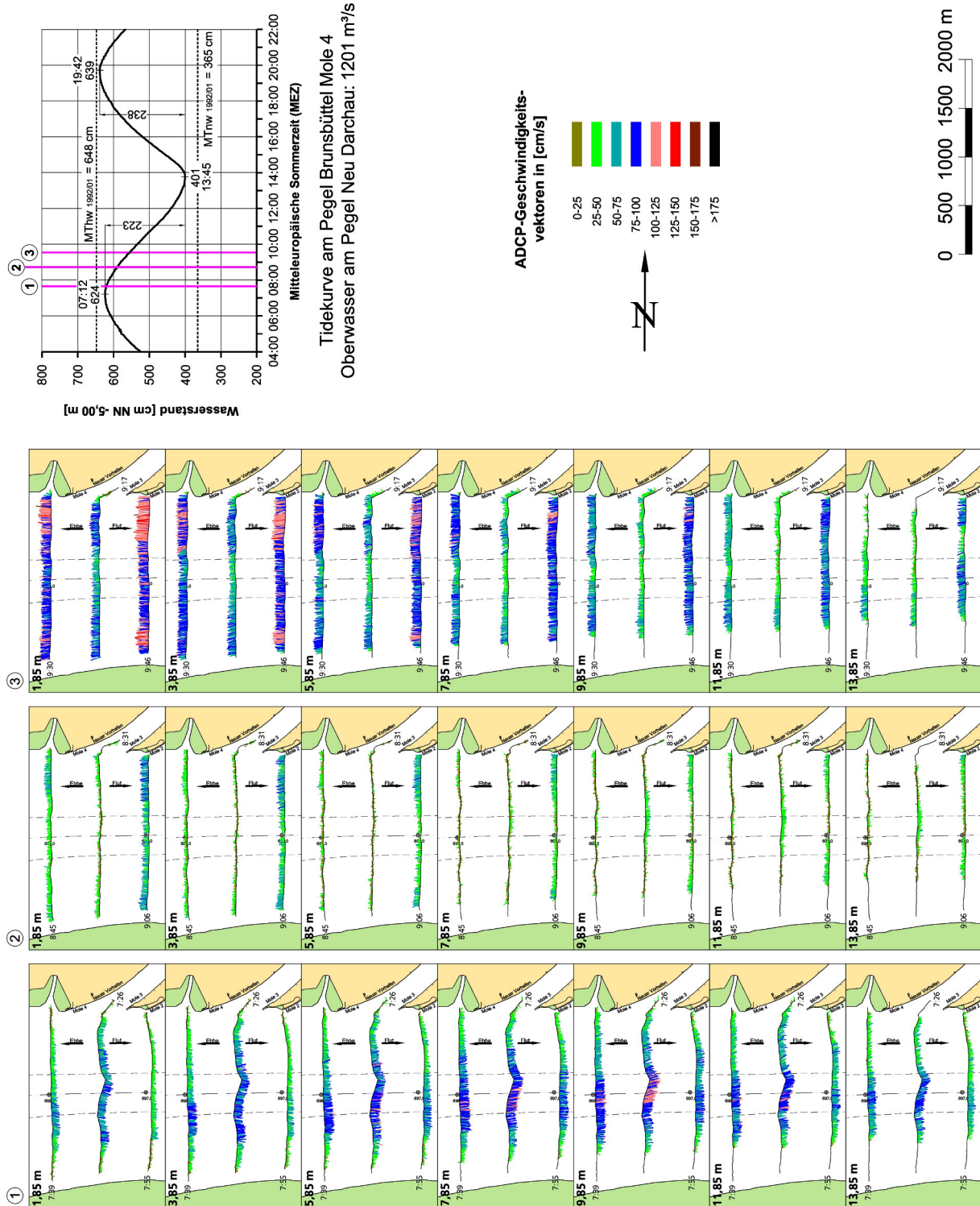


Abb. 110: Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 13.03.2007, erste Ebbephase

digkeiten von mehreren Dezimetern in den oberen Tiefenzellen festgestellt. In Sohlennähe war die Strömungsumkehr gerade erst vollzogen. Es ist bemerkenswert, dass die hydrodynamischen Gegebenheiten gegenüber der Vormessung, mit einem deutlich größeren (+33 cm) Tidefall und wesentlich geringeren Binnenabfluss, nicht stärker verändert waren.

Auch nach der Flutstromkenterung wurde ein ähnlicher Ablauf festgestellt wie bei der Messung vom Juni 2005. Die Ebbestromgeschwindigkeiten steigerten sich kontinuierlich und erreichten die Höchstwerte bei der 5. Messung in der 4. Stunde nach Thw (Abb. 111, Messung 5). Die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten waren in den oberen Wasserschichten zu verzeichnen.

Die aus den ADCP-Messungen entwickelten Strömungsprofile im Fahrwasser zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit der Messung vom Juni 2005 (vgl. Abb. 112 mit 106). Das gilt für die Vertikalprofile in der ausklingenden Flutstromphase mit den höchsten Geschwindigkeiten im tieferen Wasser, den Kentervorgang und die Geschwindigkeitsverteilung über die Wassertiefe während der Ebbestromphase. Bei genauerer Betrachtung der Abb. 111 fällt auf, dass die Ebbestrommengen in der Hauptabflussphase verstärkt in den oberen Wasserschichten und auch außerhalb des Fahrwassers auf der rechten Seite des Flusses stromab geführt wurden.

Bis zum Eintritt des Tideniedrigwassers wurden die Ebbestromintensitäten kontinuierlich schwächer. Im Fahrwasser wurden bei Thw noch sehr bemerkenswerte Geschwindigkeiten bis zu $v_e \geq 100$ cm/s registriert (Abb. 113 und Abb. 114). Etwa eine Stunde nach Tideniedrigwasser begann die Ebbestromkenterung im mittleren Querprofil in den tieferen Wasserschichten.

Mit Abb. 114 kann das Abklingen der Ebbestromintensitäten bis zur Strömungsumkehr nachvollzogen und mit Abb. 109 verglichen werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die hydrodynamischen Vorgänge in der Elbe bei Brunsbüttel durch das erhöhte Oberwasser im März 2007 und die dadurch bedingten geringeren Salzgehalte nicht grundlegend verändert worden sind. Das haben der Vergleich mit den ADCP-Messungen aus dem Jahr 2005 gezeigt.

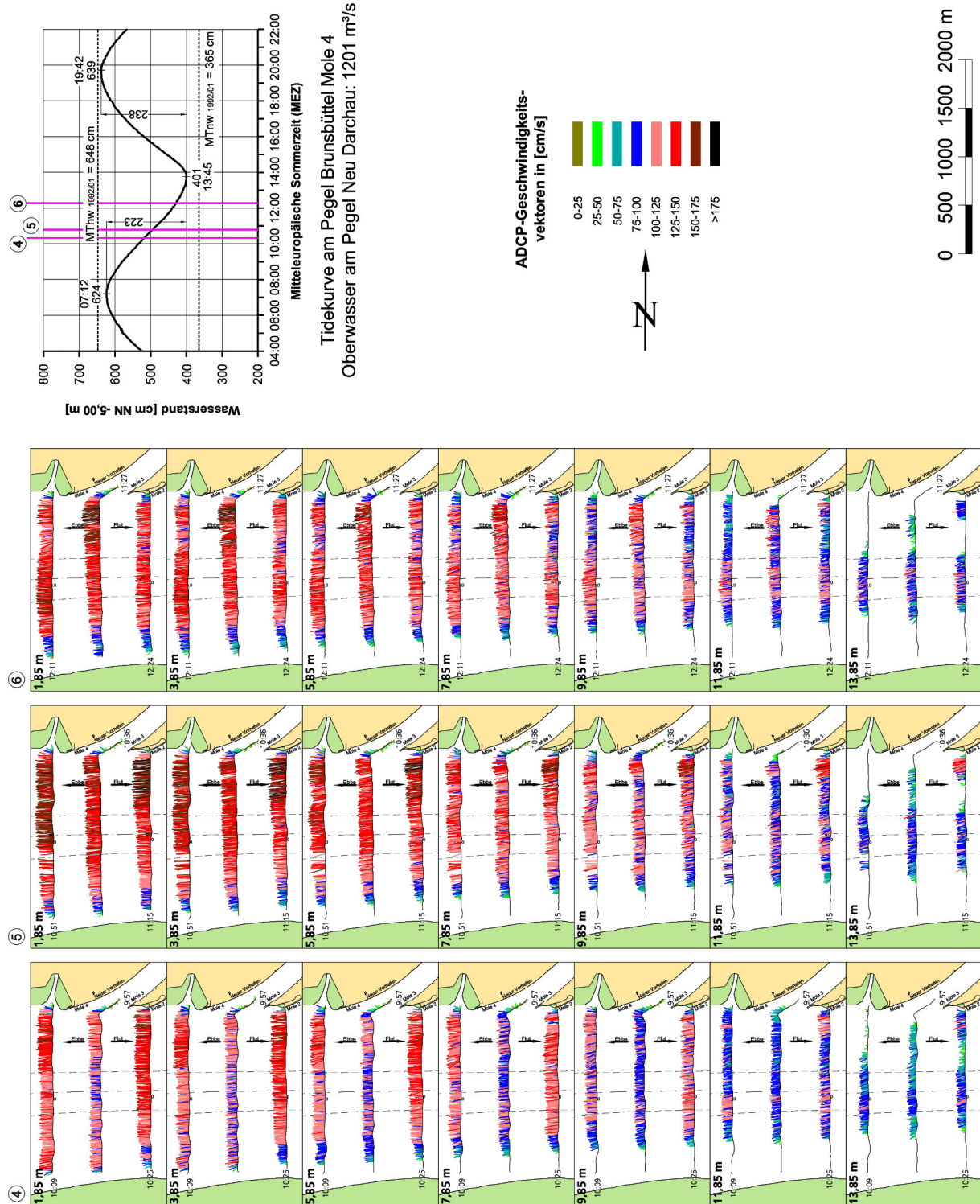
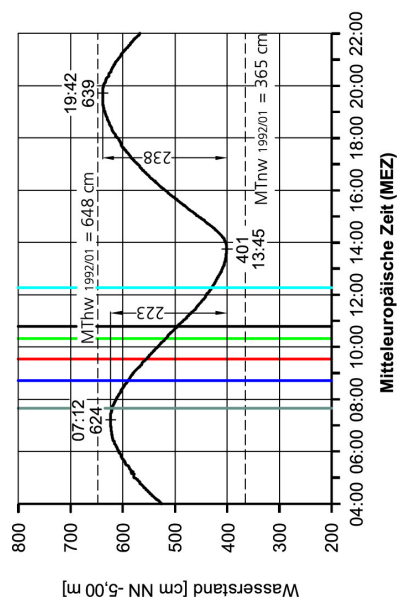


Abb. 111: Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 13.03.2007, zweite Ebbephase



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4
 Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1201 m³/s

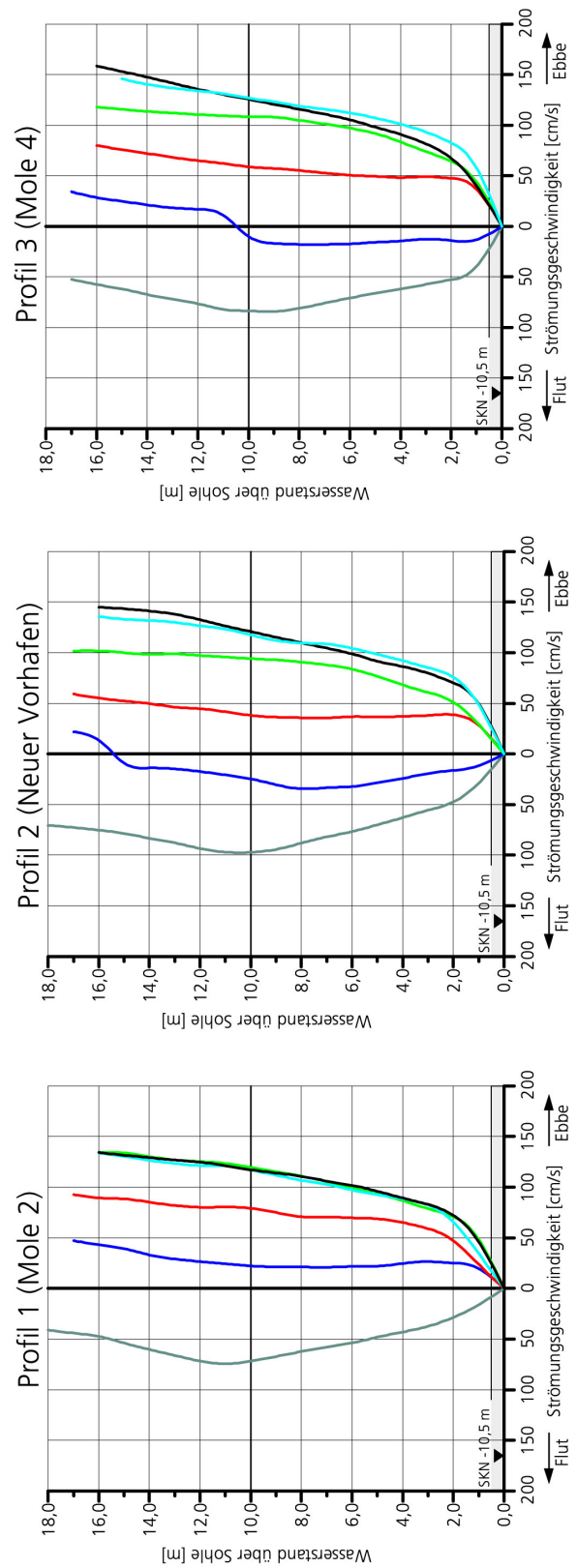


Abb. 112: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 13.03.2007 (Lage der Profile s. Abb. 92)

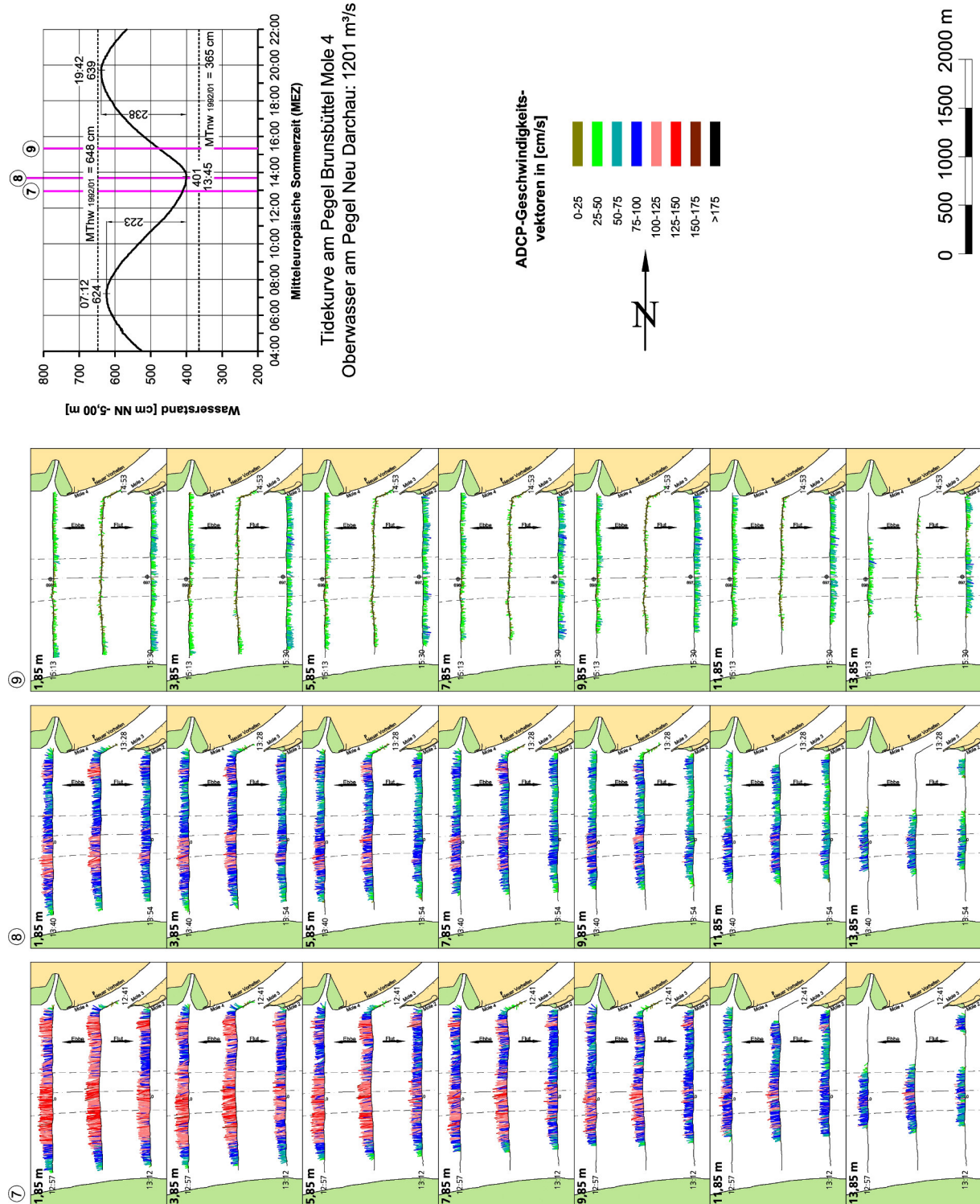


Abb. 113: Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 13.03.2007, letzte Ebbephase

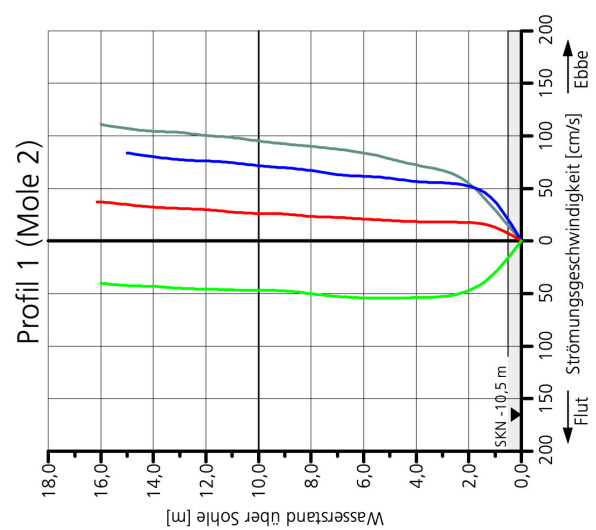
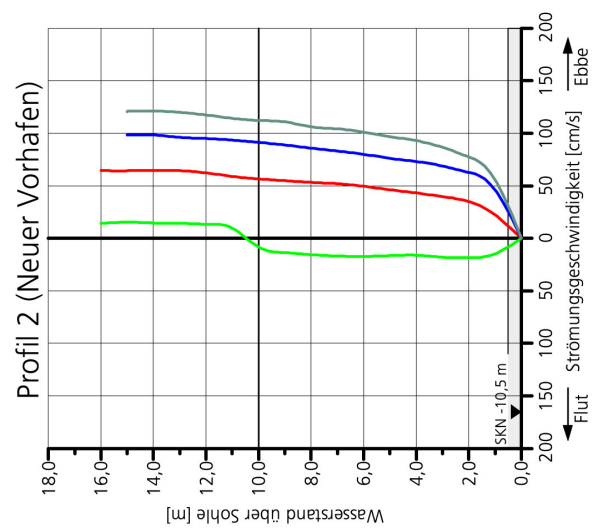
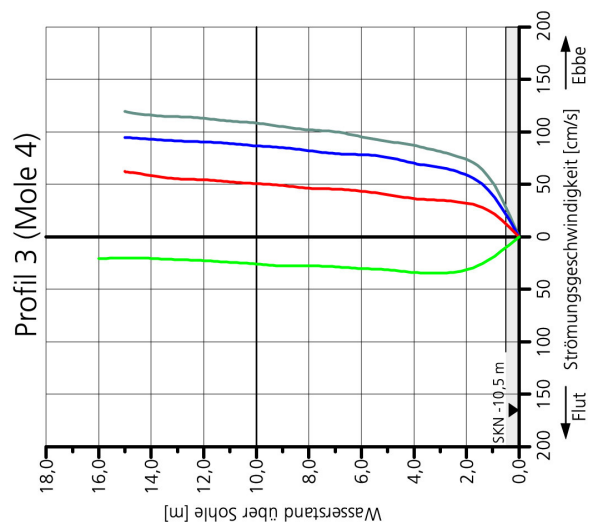
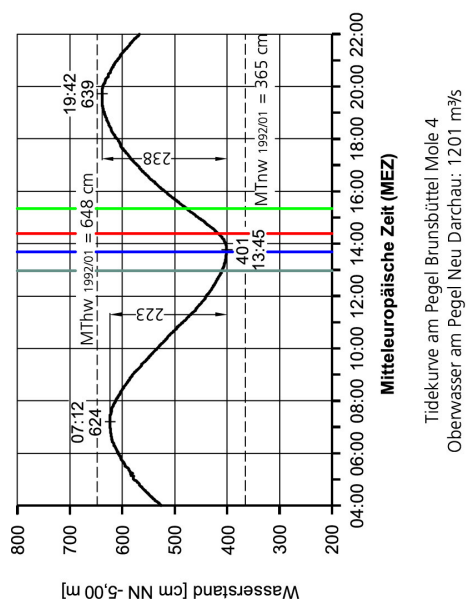


Abb. 114: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 13.03.2007 (Lage der Profile s. Abb. 92)

6.2 Schleusenvorhöfen am Nord-Ostsee-Kanal

Ergänzend zu den im vorausgegangenen vom BMBF geförderten KFKI-Projekt 03 KIS 019 waren in diesem Vorhaben 03 KIS 051 zusätzlich die im Brackwasserbereich der Elbe liegenden Vorhöfen der Schleusen des Nord-Ostsee-Kanals zu untersuchen. Damit sollte geprüft werden, ob die tide- und oberwasserabhängigen Strömungsvorgänge in den Brackwasservorhöfen der Weser und Ems mit denen an der Elbe vergleichbar sind und die bisher gewonnenen Erkenntnisse verallgemeinert werden können.

6.2.1 Strömungen im Neuen Vorhafen

Die Schleusenvorhöfen des Nord-Ostsee-Kanals ähneln sich in ihrer Geometrie und Lage zum Tidestrom. Von Interesse ist es, wie sich die unterschiedlichen Abmessungen und Ausbautiefen der Vorhöfen bei gleichen Randbedingungen in der Tideelbe auf die Strömungs- und Dichteeffekte auswirken.

• Flutströmungen

Bei der Tide vom 5. Juli 2005 trat das Tideniedrigwasser (Thw) gegenüber dem langjährigen Mittelwert um 5 dm höher ein (Abb. 115). Der Nipptidehub betrug 252 cm ($MThb_{1992/01} = 283$ cm) und auch das Tidehochwasser (Thw) war durch Windstau um rd. 2 dm erhöht. Bis zur beginnenden Flutstromphase sind im Neuen Vorhafen die ebbestromorientierten Dichteströmungen in Abb. 115 auszumachen. In der letzten Ebbestrom- und ersten Flutstromphase ist im Vorhafen in den oberen Wasserschichten der Stromeffekt zu erkennen (Messungen 1 und 2 in Abb. 115). Typisch sind auch die nach außen gerichteten Dichteströmungen in den unteren Wasserschichten. In der dritten Stunde nach Thw kommt es zur Strömungsumkehr im Neuen Vorhafen. Bei der 3. Messung sind nur geringe Wasserbewegungen zu erkennen. Mit fortschreitender Tidedauer prägen sich in der späteren Tidephase die flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen aus (Abb. 116, Messung 4 bis 6).

Typisch sind die sich von der Strömungswalze ablösenden Einströmungen in den tieferen Wasserschichten und die Ausströmungen in den oberen Tiefenzellen. Dabei wird das Wasser verstärkt auf der südlichen Vorhafenseite ein- und im nördlichen Bereich ausgetragen. Die Überlagerungen der flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen sind auch noch nach Thw zu beobachten (Messung 6 in Abb. 116). Sie schwächen sich erst nach der Kenterung mit der einsetzenden Ebbeströmung ab.

Die Flutmessungen wurden im Neuen Vorhafen während der gleichen Messkampagne bei mittleren Tidebedingungen ($Thb = 278$ cm) und höherem Oberwasser ($Q_0 = 435$ m³/s) am 14. Juli 2005 wiederholt (Abb. 117). Die Ebbestromkenterung trat etwa 1 Stunde nach dem Eintritt des Thw ein und die Flutströmung setzte sich verstärkt im tieferen Wasser durch (Messungen 1 bis 3 in Abb. 117).

Die ebbeorientierten Strömungen im Neuen Vorhafen kamen wie bei der Vormessung ebenfalls in der dritten Stunde nach Thw zum Erliegen. Die linksdrehenden Flutstromwalzen traten zunächst in den oberen Schichten auf (Messungen 3 in Abb. 117) und setzten sich später mit den

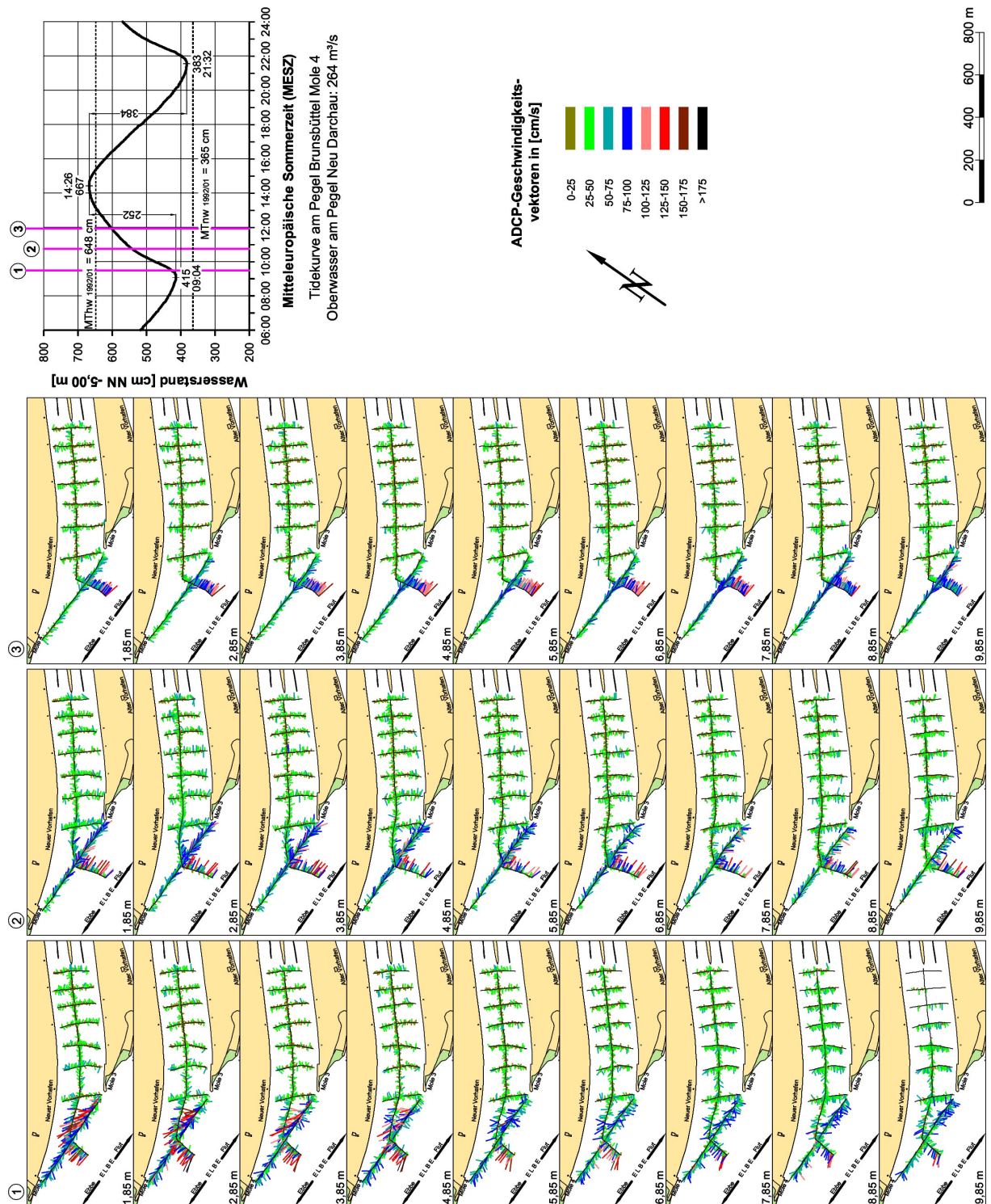


Abb. 115: Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 05.07.2005, erste Flutphase

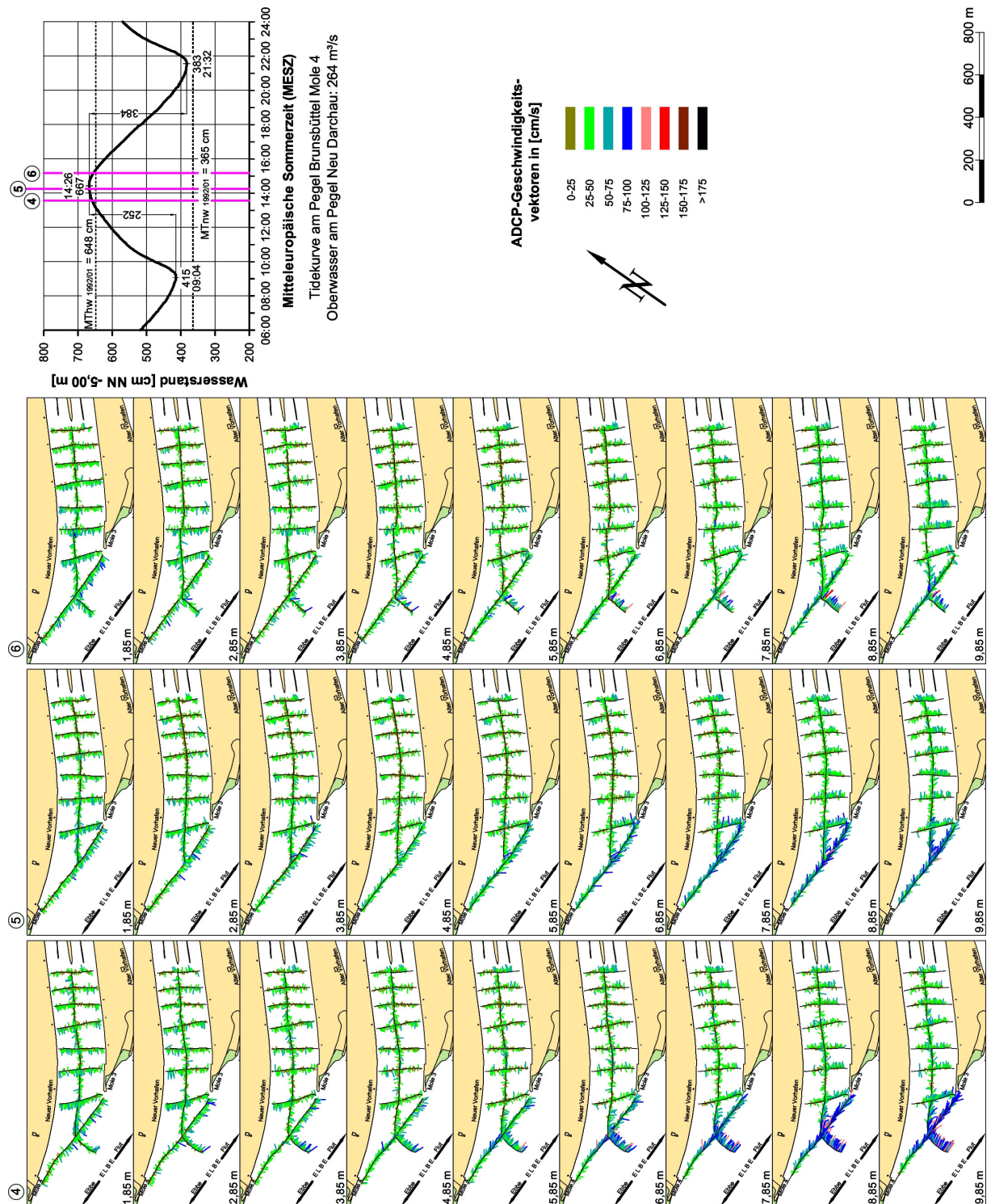


Abb. 116: Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 05.07.2005, zweite Flutphase

veränderlichen Salzgehalten mehr in den unteren Tiefenzellen durch (Messungen 4 in Abb. 118). Anschließend kommt es in der fortgeschrittenen Flutstromphase, wie in den anderen Brackwasserhäfen zu den voll ausgeprägten Dichte- und Strömungseffekten. Die Ausströmung in den oberen Wasserschichten wirken sich bis in den Tidestrom aus (Abb. 118). Zum Vergleich wird auch auf die Abb. 116 (Messungen 4 bis 6) verwiesen. In den unteren Tiefenzellen zeigen sich bei den beiden Messungen vom Juli 2005 ebenfalls vergleichbare Strömungsbilder.

Die Strömungsmessungen im Neuen Vorhafen wurden zum Vergleich am 21. März 2007 bei einem Springtidehub von $Thb = 327$ cm und erhöhtem Oberwasser durchgeführt (Abb. 119). In Neu Darchau betrug der Abfluss 10 Tage nach dem Durchgang der Oberwasserspitzte $Q_0 = 842$ m³/s (Abb. 98). Die Salzgehaltsverhältnisse in Brunsbüttel entsprachen jedoch mehr den vorausgegangenen, höheren Oberwasserbedingungen in Neu Darchau, die sich inzwischen bis Brunsbüttel durchgesetzt hatten.

Während der Niedrigwasserphase sind die Strömungs- und Dichteeffekte im Vorhafen deutlich schwächer ausgeprägt als bei den Messungen vom Juli 2005 (vgl. Abb. 119 mit 115 und 117). Der schwächere Brackwassereinfluss auch im Tidefluss ist daran erkennbar, dass die Ebbestromkenterung bei der 2. Messung im Tidestrom fast gleichmäßig über die Wassertiefe verteilt ist. Auch nach der Kenterung nehmen die Flutstromgeschwindigkeiten kontinuierlich mit der Tiefe ab (Messung 3 in Abb. 119 und 4. Messung in Abb. 120).

In der ersten Flutstromphase sind nur schwache Flutstromwalzen und Einstömungen im südlichen Vorhafenbereich zu erkennen.

Auch während der Tidehochwasserphase waren am 21. März 2007 trotz Springtide nur geringe Wasserbewegungen im Neuen Vorhafen zu verzeichnen (Abb. 120). Zum Vergleich können die Ergebnisse vom Juli 2005 herangezogen werden (Abb. 116 und 118).

• Ebbeströmungen

Die Ebbeströmungen sind am 28. Juni 2005 bei etwa mittleren Tideverhältnissen untersucht worden. Der Abfluss am Pegel Neu Darchau betrug $Q_0 = 325$ m³/s und der Tidefall 271 cm (Abb. 121).

Zu Beginn der Messungen herrschte reger Schiffsverkehr im Neuen Vorhafen. Offenbar sind dadurch die natürlichen Strömungs- und Dichteeffekte durch schiffserzeugte Strömungen überlagert worden. Das erklärt die verhältnismäßig starken und ungleichmäßigen Ausströmungen zur Elbe in den oberen Tiefenzellen bei der ersten Messungen (Abb. 121). Die nach Thw typischen, sohlennahen Dichteströmungen in den Vorhafen (vgl. Abb. 116 und 118) wurden ebenfalls schiff-fahrtsbedingt unterbunden.

Bei voll ausgeprägtem Ebbestrom sind in den oberen Schichten die im äußeren Vorhafen im Uhrzeigersinn drehenden Walzenströmungen auszumachen (Abb. 121, Messungen 3 und Abb. 122, Messung 4 und 5). Gleichzeitig führen die Dichteeffekte zu einer sich verstärkenden Ausströmung des schwereren, salzhaltigeren Wassers in den tiefer liegenden Schichten. Die Dichteeffekte bleiben bis zur einsetzenden Ebbestromkenterung erhalten.

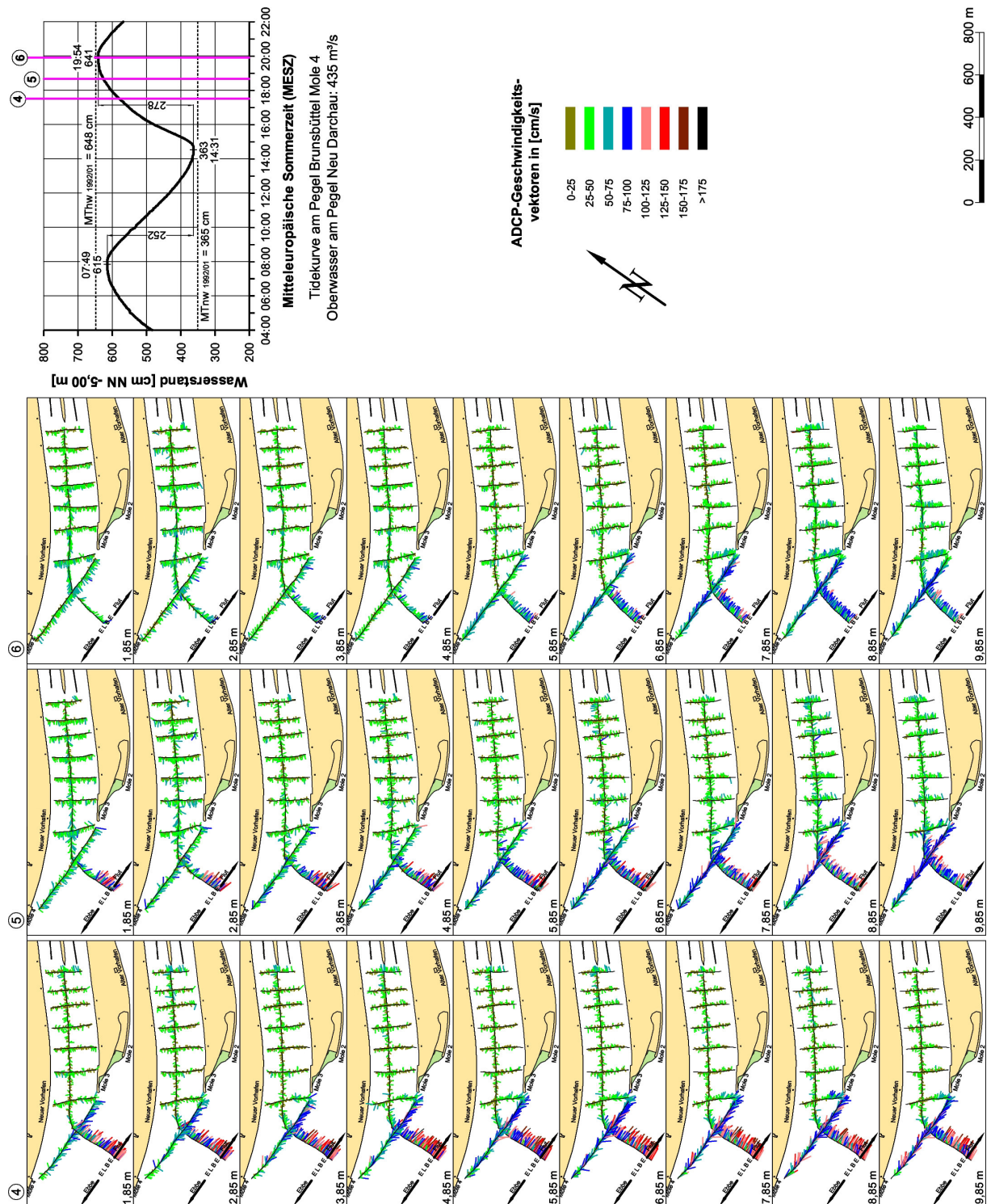


Abb. 118: Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 14.07.2005, zweite Flutphase

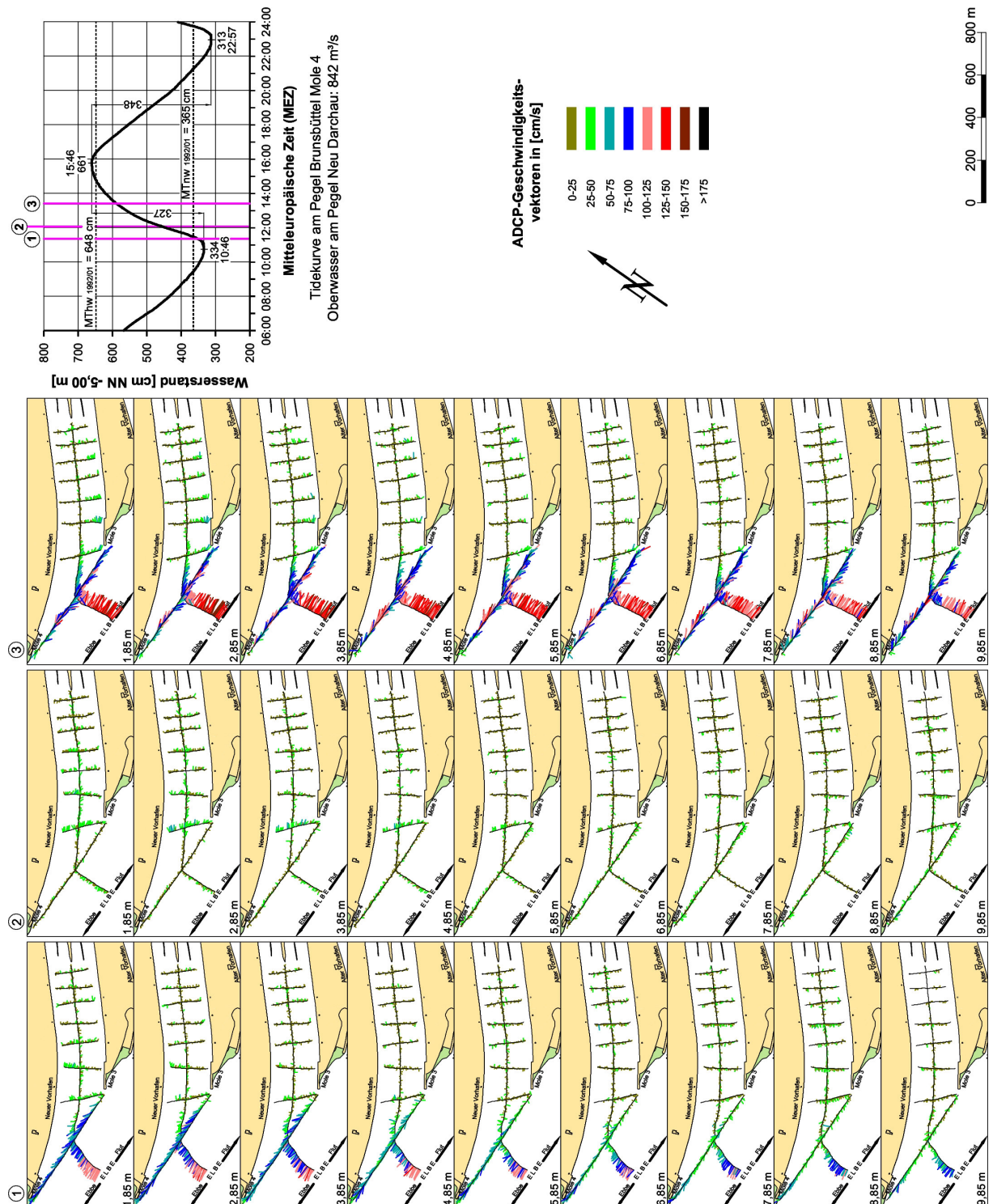


Abb. 119: Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 21.03.2007, erste Flutphase

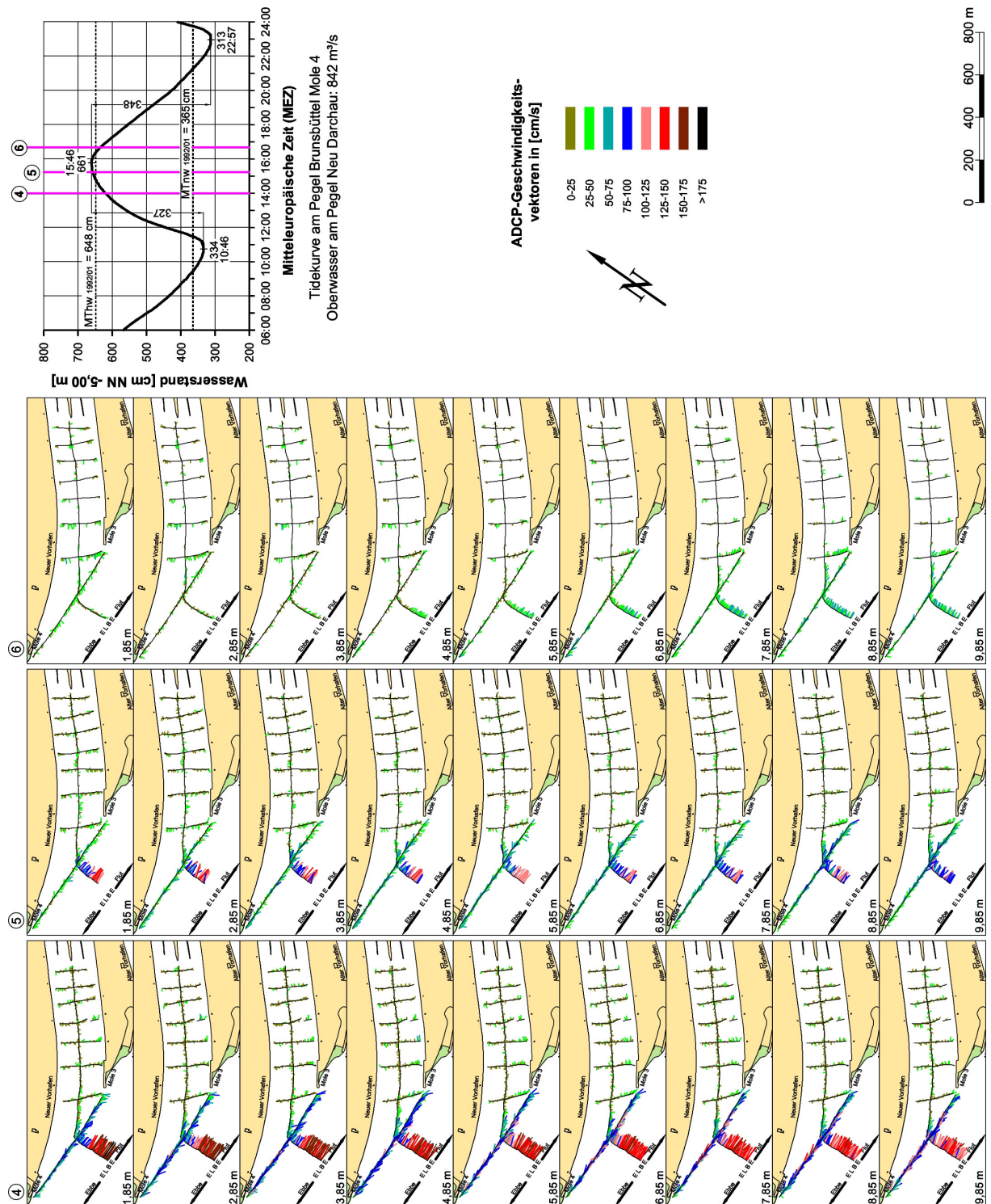


Abb. 120: Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 21.03.2007, zweite Flutphase

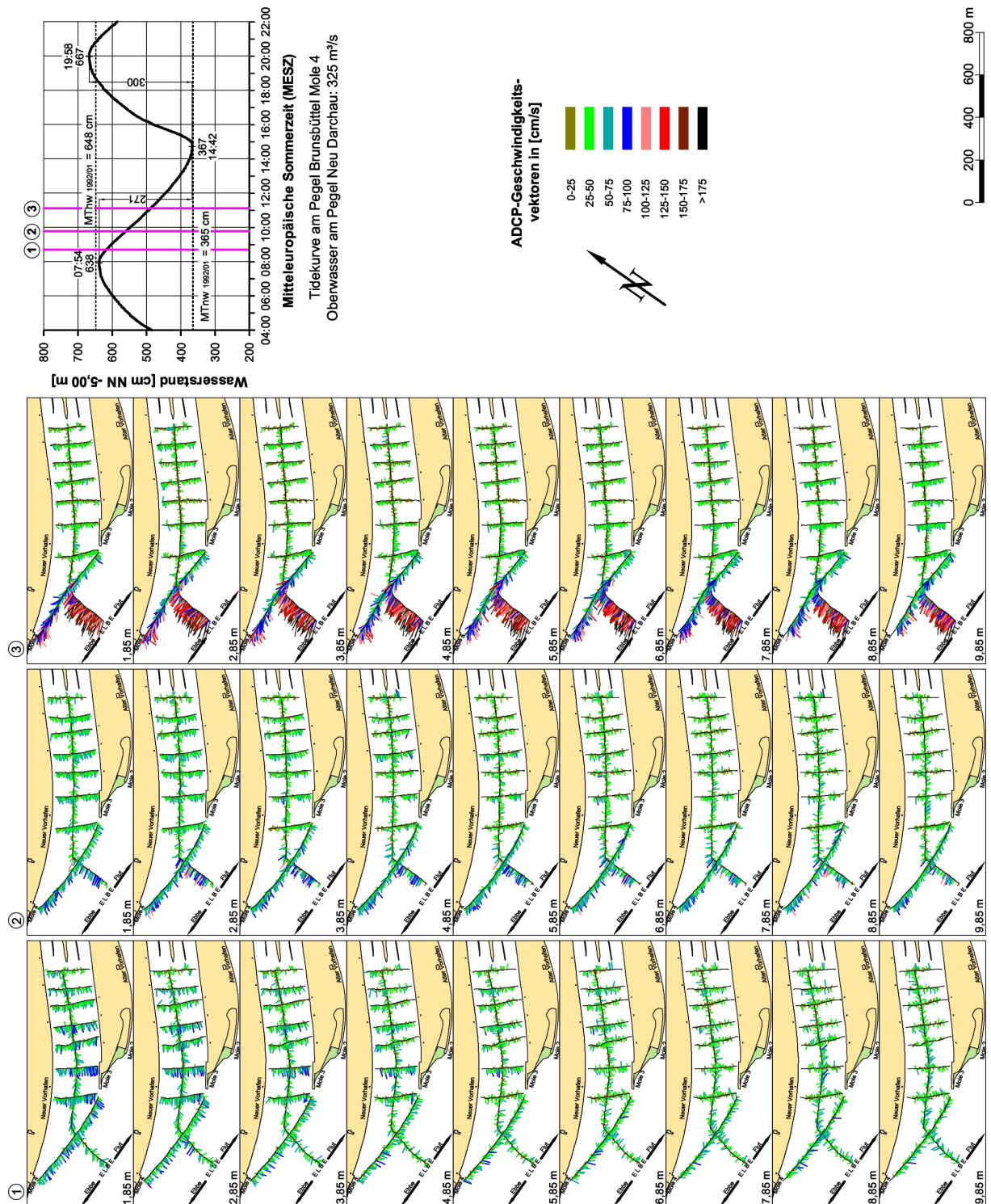


Abb. 121: Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 28.06.2005, erste Ebbephase

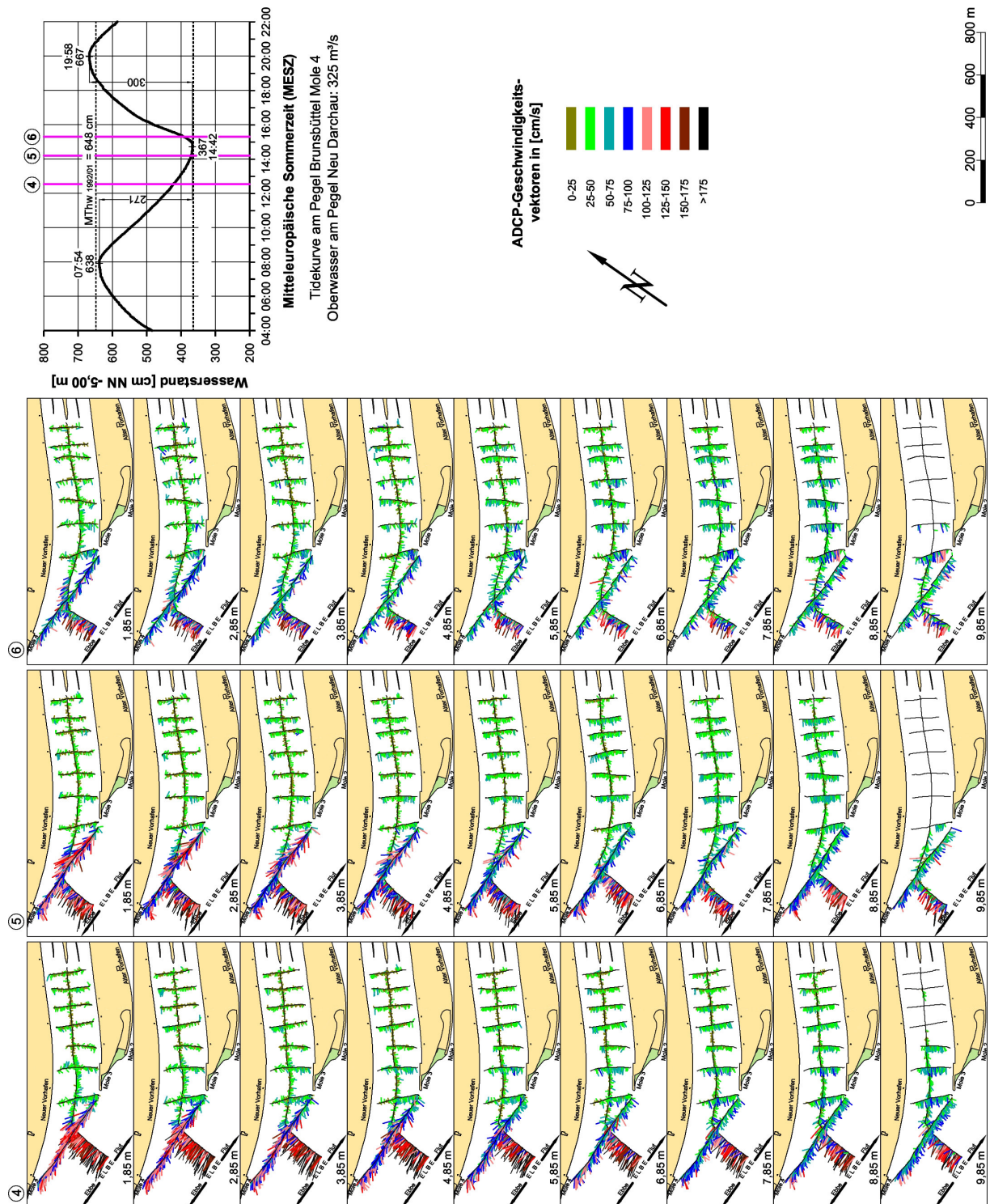


Abb. 122: Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 28.06.2005, zweite Ebbephase

Am 13. Juli 2005 wurde die Ebbemessung bei einem Nipptidehub von 255 cm und etwas erhöhtem $Q_0 = 425 \text{ m}^3/\text{s}$ in Neu Darchau wiederholt (Abb. 123).

Die Flutstromkenterung wird mit der ersten Messung in Abb. 123 dokumentiert. Die dichtebedingten, oberflächlich aus dem Hafen strömenden Wassermengen wirken sich bis in den Tidestrom aus. Das salzhaltigere Wasser wurde in den tiefen Zellen in den Vorhafen eingetragen. Im Zentrum der Dichtewalze waren die geringsten Wasserbewegungen zu verzeichnen (mittlere Tiefenzellen, 5,85 m in Abb. 123). In der ersten Ebbestromphase waren im Neuen Vorhafen keine bemerkenswerten Wasserbewegungen vorhanden (Abb. 122, Messung 3).

Die auch in den anderen Brackwasserhäfen typischen Walzen- und Dichteströmungen bilden sich erst in der späteren Ebbestromphase aus (Abb. 124, Messung 4 bis 6).

Über die rechtsdrehenden Walzen gelangt das leichtere Wasser aus der Elbe oberflächlich in den Vorhafen. Das im Vorhafen anstehende salzigere Wasser strömt dichtebedingt sohlennah zurück zum Tidestrom. Diese Strömungsvorgänge lösen sich erst nach Abschluss der Ebbestromkenterung in der dritten Stunde nach Thw mit der einsetzenden Flutstromphase auf (vgl. Abb. 117, Messungen 1 bis 3).

Die veränderte Situation im Neuen Vorhafen bei höheren Binnenabflüssen und einer Nipptide wurde am 14. März 2007 beobachtet (Abb. 125). Das Oberwasser betrug in Neu Darchau drei Tage nach dem Höchstabfluss noch $Q_0 = 1129 \text{ m}^3/\text{s}$ (s. Abb. 98) bei einem Tidefall in Brunsbüttel von 215 cm.

Die hydrologischen Randbedingungen (hohes Oberwasser, geringer Tidefall) erklären die insgesamt schwachen Strömungsvorgänge in Abb. 125 und Abb. 126. An den ersten beiden Messungen ist zu erkennen, wie sich die Flutstromkenterung brackwasserbedingt von oben nach unten durchsetzt und rd. zwei Stunden nach Thw abgeschlossen ist.

Bedingt durch die Tide- und Oberwasserbedingungen waren im Neuen Vorhafen im Verlauf der Ebbestromphase nur sehr geringe Wasserbewegungen zu verzeichnen. Ebbestromorientierte Strömungs- und Dichteeffekte waren nur schwach ausgeprägt und kaum nachweisbar (Abb. 125 und 126).

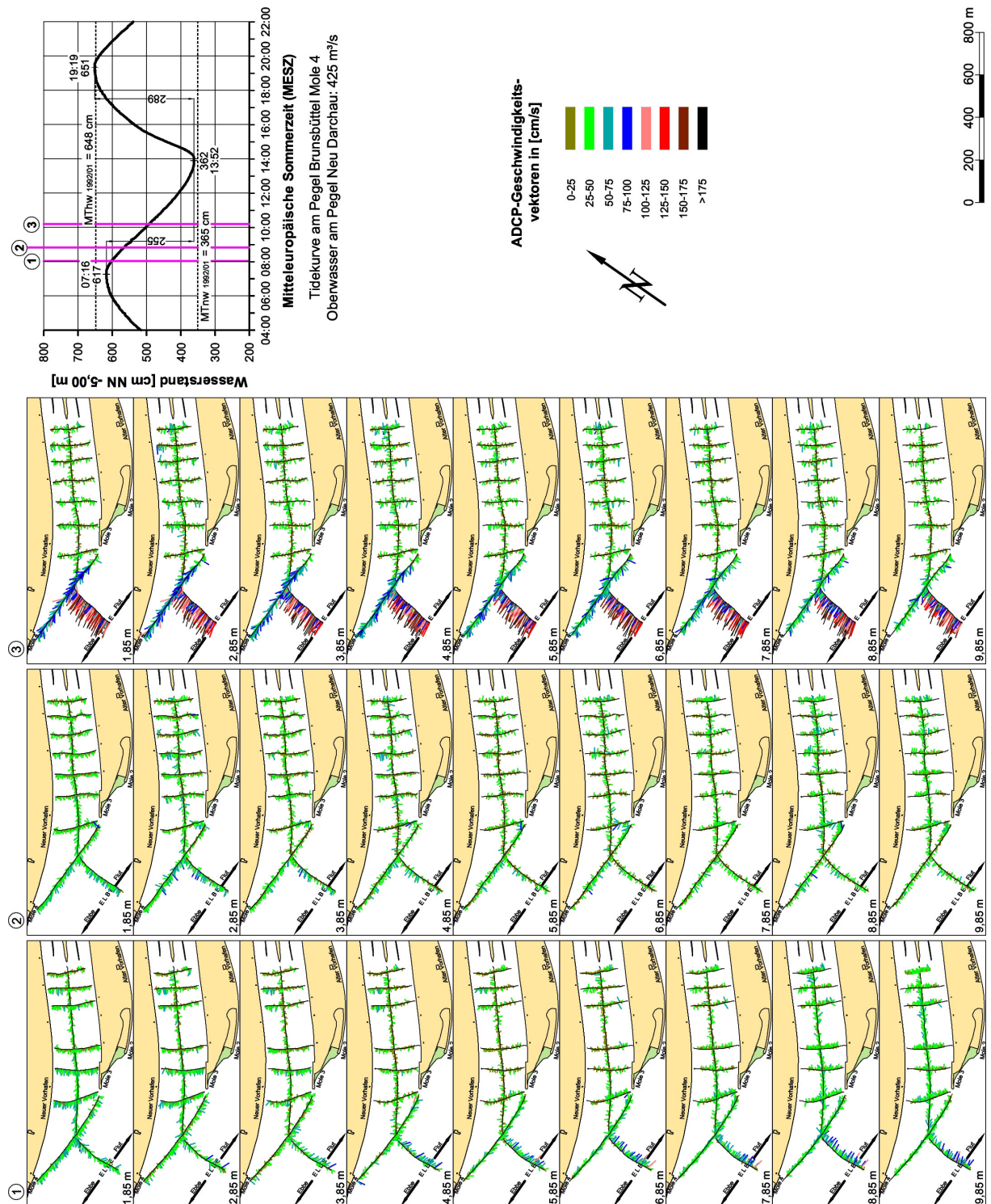


Abb. 123: Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 13.07.2005, erste Ebbephase

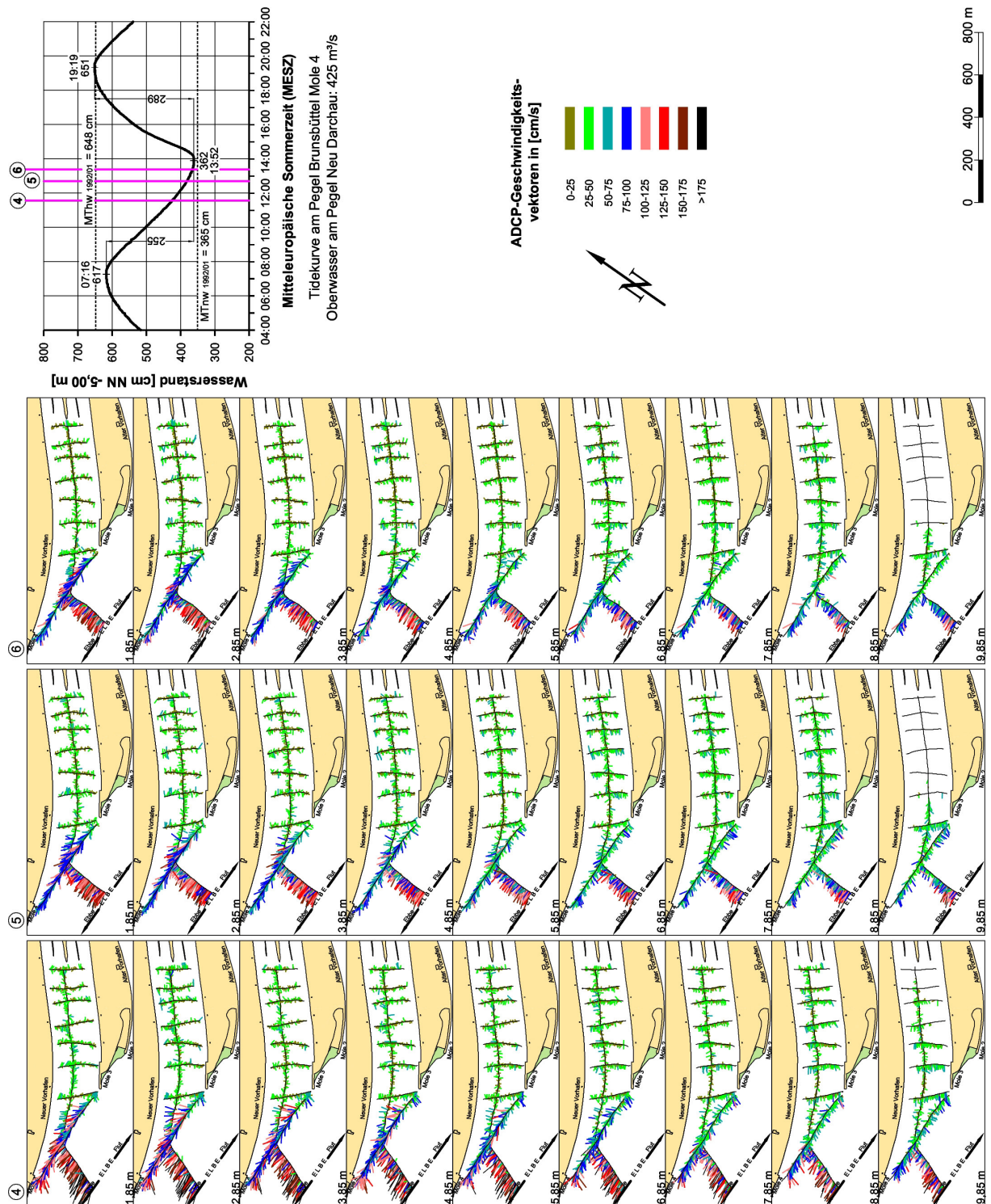


Abb. 124: Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 13.07.2005, zweite Ebbephase

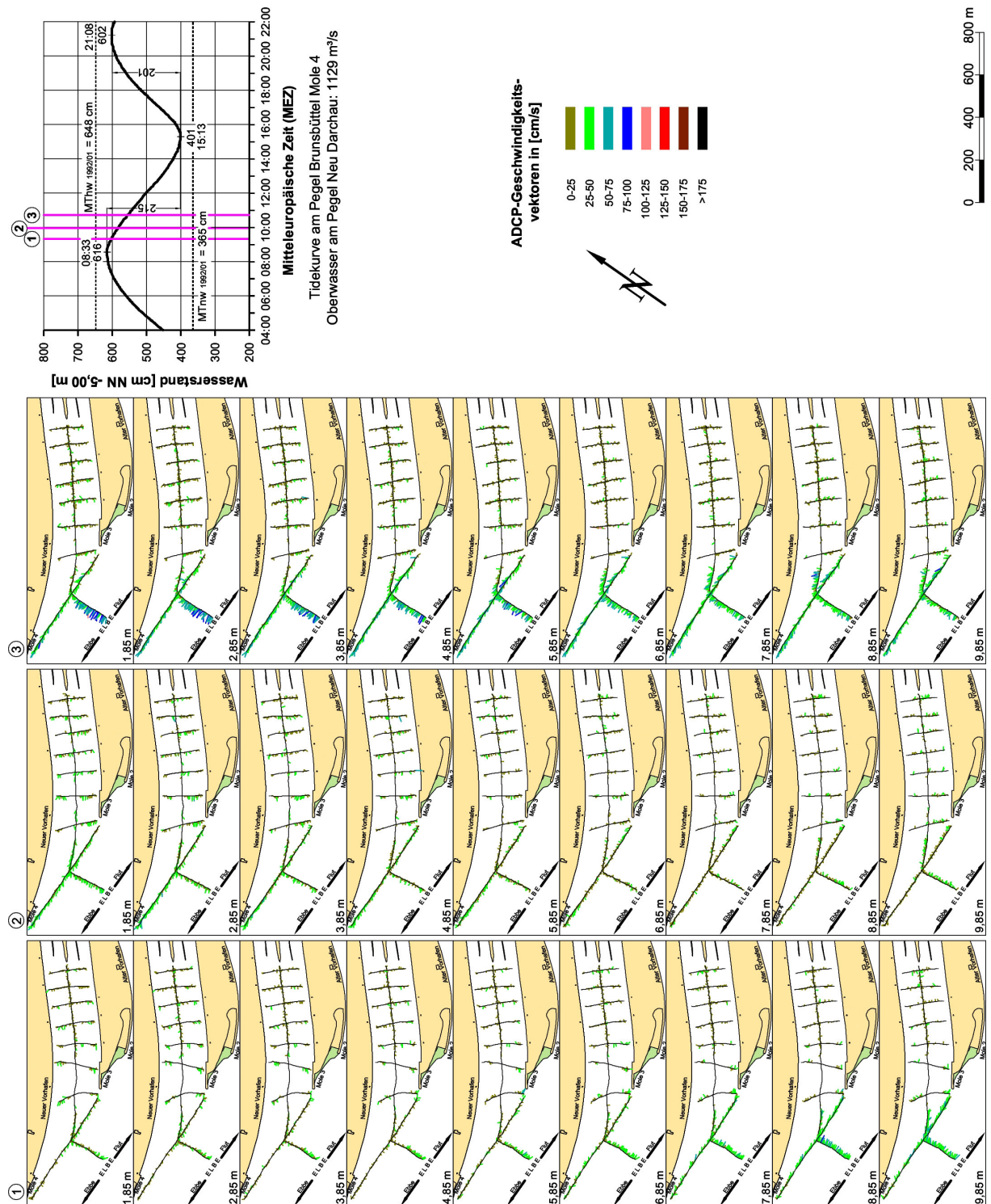


Abb. 125: Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 14.03.2007, erste Ebbephase

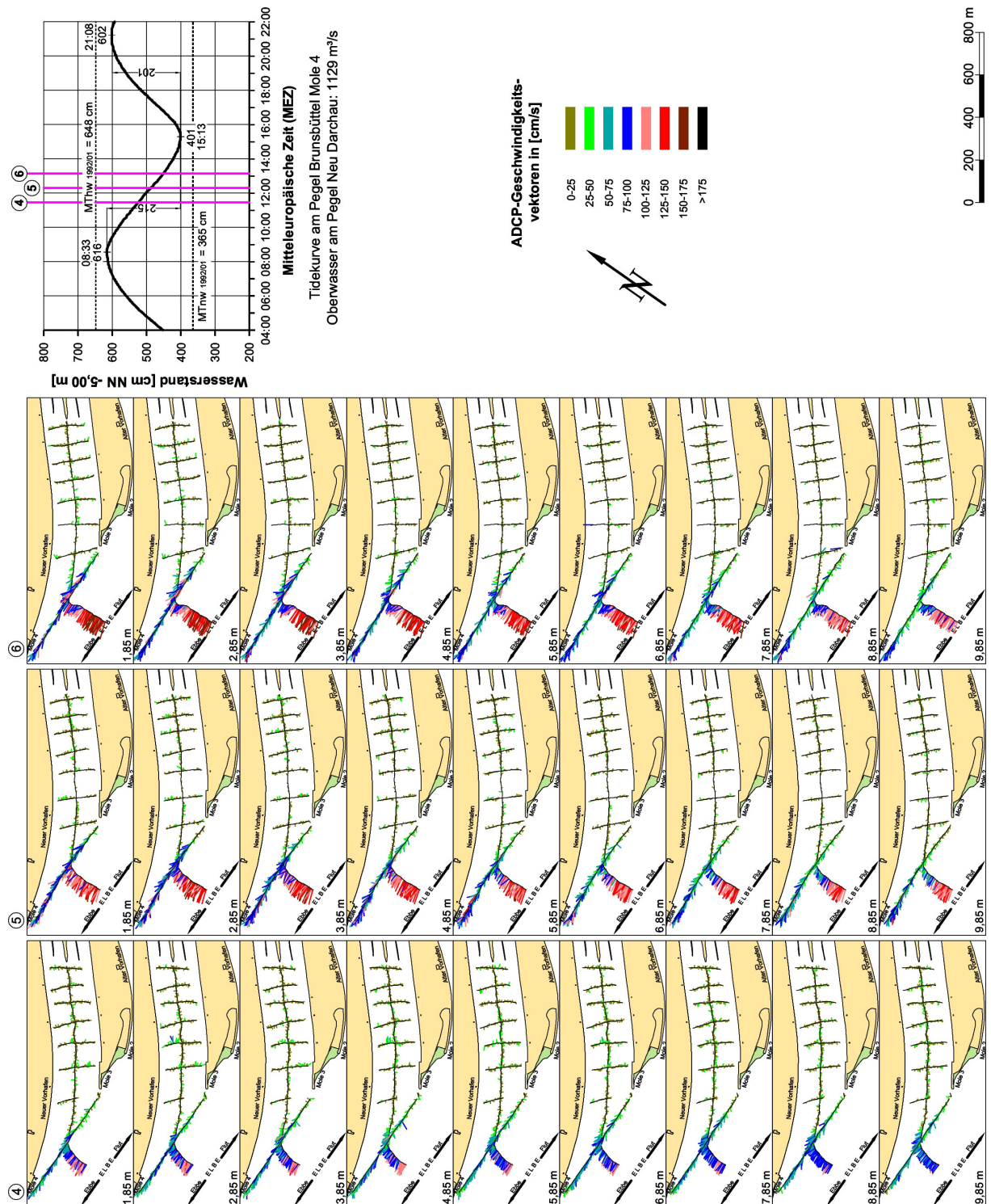


Abb. 126: Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 14.03.2007, zweite Ebbphase

6.2.2 Strömungsmessungen im Alten Vorhafen

• Flutströmungen

Am 11. Juli 2005 herrschten mittlere Tideverhältnisse bei einem $Q_0 = 410 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 127). Erwartungsgemäß sind die Strömungs- und Dichteeffekte im Alten Vorhafen wegen der geringeren Abmessung und Ausbautiefe schwächer ausgeprägt als in der größeren Schleusenzufahrt. Bei Abschluss der Ebbestromkenterung etwa 1,5 Stunden nach Thw (Messung 1) sind in der oberen Tiefenzelle noch die zur Schleuse gerichteten Strömungsvektoren in Abb. 127 auszumachen. Weiter unten ist die Strömung entgegengesetzt zur Elbe gerichtet. Erst in der späteren Flutstromphase (Messung 3 in Abb. 127) sind in den unteren Schichten im Einfahrtsbereich die schwachen Flutstromwalzen und Einströmungen im südlichen Vorhafen zu erkennen. Mit nachlassender Flutströmung in der Elbe verstärken sich die hydrodynamischen Vorgänge im Vorhafen (Abb. 128, Messungen 4 und 5). Die oben und unten entgegengesetzt ziehenden Dichteströmungen halten wie im Neuen Vorhafen bis zum Ende der Kenterphase in sich abschwächender Form an (Abb. 128, Messung 6).

Bedingt durch das höhere Oberwasser sind Brackwassereffekte bei der Messung vom März 2007 kaum noch auszumachen (Abb. 129 und 130). Dabei sind die Dichteströmungen zum Ende der Ebbestromphase (Messungen 1 und 2 in Abb. 129) weniger stark ausgeprägt als nach dem Eintritt des Thw. Mit der 5. und 6. Messung in Abb. 130 wird die Strömung zur Elbe (oben) und zur Schleuse (unten) dokumentiert. Auch bei höherem Binnenabfluss sind die Strömungs- und damit die Sedimentationsursachen in den Vorhäfen des Nord-Ostsee-Kanals flutstromorientiert.

• Ebbeströmungen

Am 14. Juli 2005 betrug der Nipptidefall 252 cm bei einem Oberwasserabfluss in Neu Darchau von $Q_0 = 435 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 131). Die Flutstromkenterung begann rd. eine Stunde nach Thw in den oberen Wasserschichten (Messung 1) und hatte sich bei der zweiten Messung rd. 1,5 Stunden nach Thw bis zur unteren Tiefenzelle durchgesetzt. Die flutstromorientierten Strömungs- und Dichteeffekte schwächen sich während der Kenterphase ab (Messungen 1 und 2). In der ersten Ebbestromphase waren keine nennenswerten Strömungsvorgänge im Alten Vorhafen zu beobachten (Abb. 131, Messung 3).

Wie in anderen Brackwasserhäfen findet mit fortschreitender Ebbestromdauer der Wasseraustausch durch die in den oberen Wasserschichten rechtsdrehende Ebbestromwalze im Einfahrtsbereich statt. Von der Walze aus strömen die Wassermengen zum Außenhaupt und in den tieferen Zellen zur Elbe zurück (Abb. 132). Es stellen sich die ebbestromorientierten Dichtestromwalzen mit horizontaler Achse ein. Die Überlagerungen der Strömungs- und Dichteeffekte sind bis zur letzten bei Thw ausgeführten Messung auszumachen. Sie kommen erst nach der Ebbestromkenterung zum Erliegen.

Am 27. März 2007 betrug der Tidefall lediglich 227 cm und das Oberwasser in Neu Darchau $Q_0 = 940 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 133 und 134). Wie bei den Messungen an der Weser und Ems zeigte sich auch an der Unterelbe, dass sich die geringeren Tidewassermengen bei Nipptiden auf die Salzkonzentrationen und Gradienten auswirken. Außerdem verschiebt sich bekanntlich die

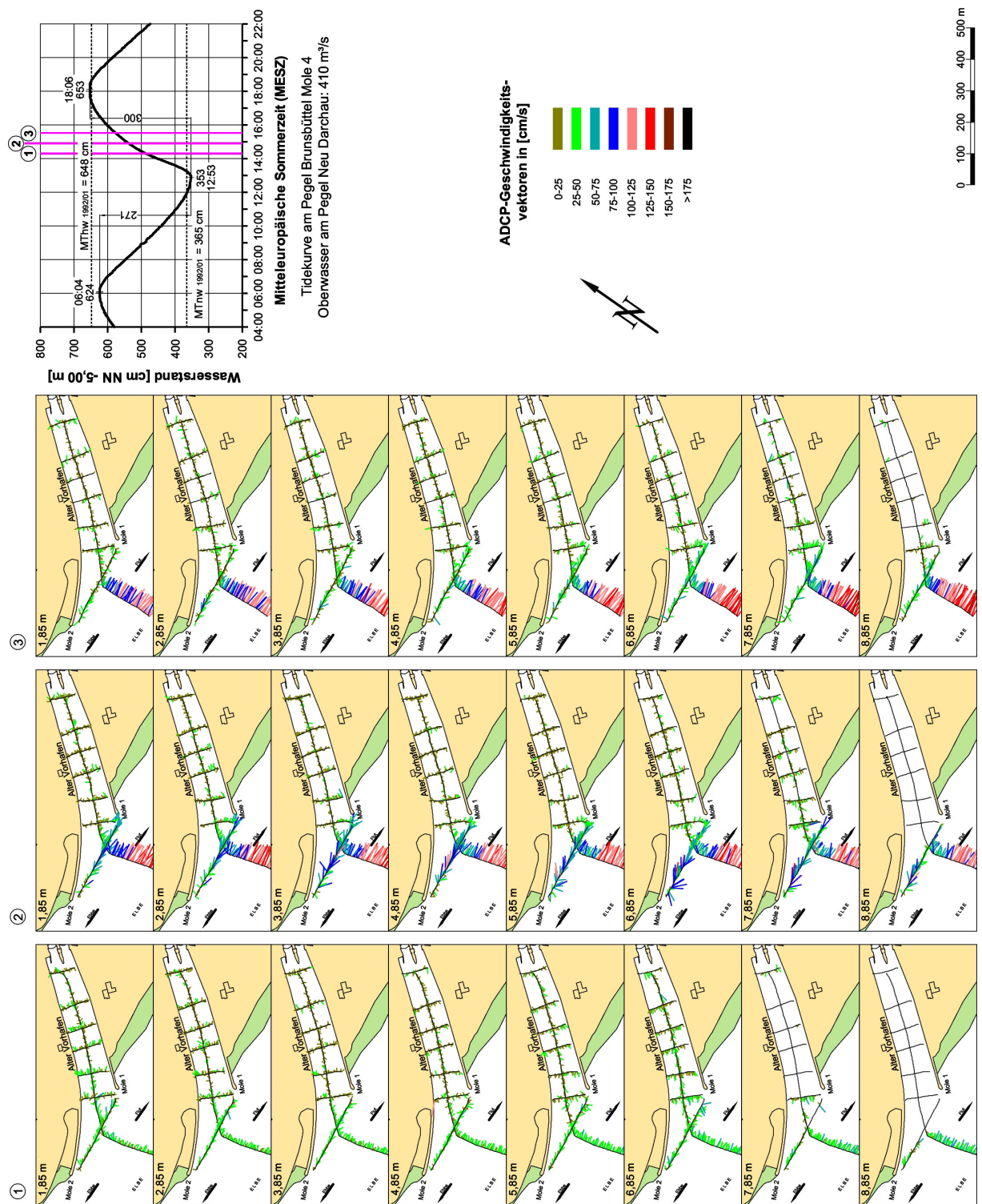


Abb. 127: Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 11.07.2005, erste Flutphase

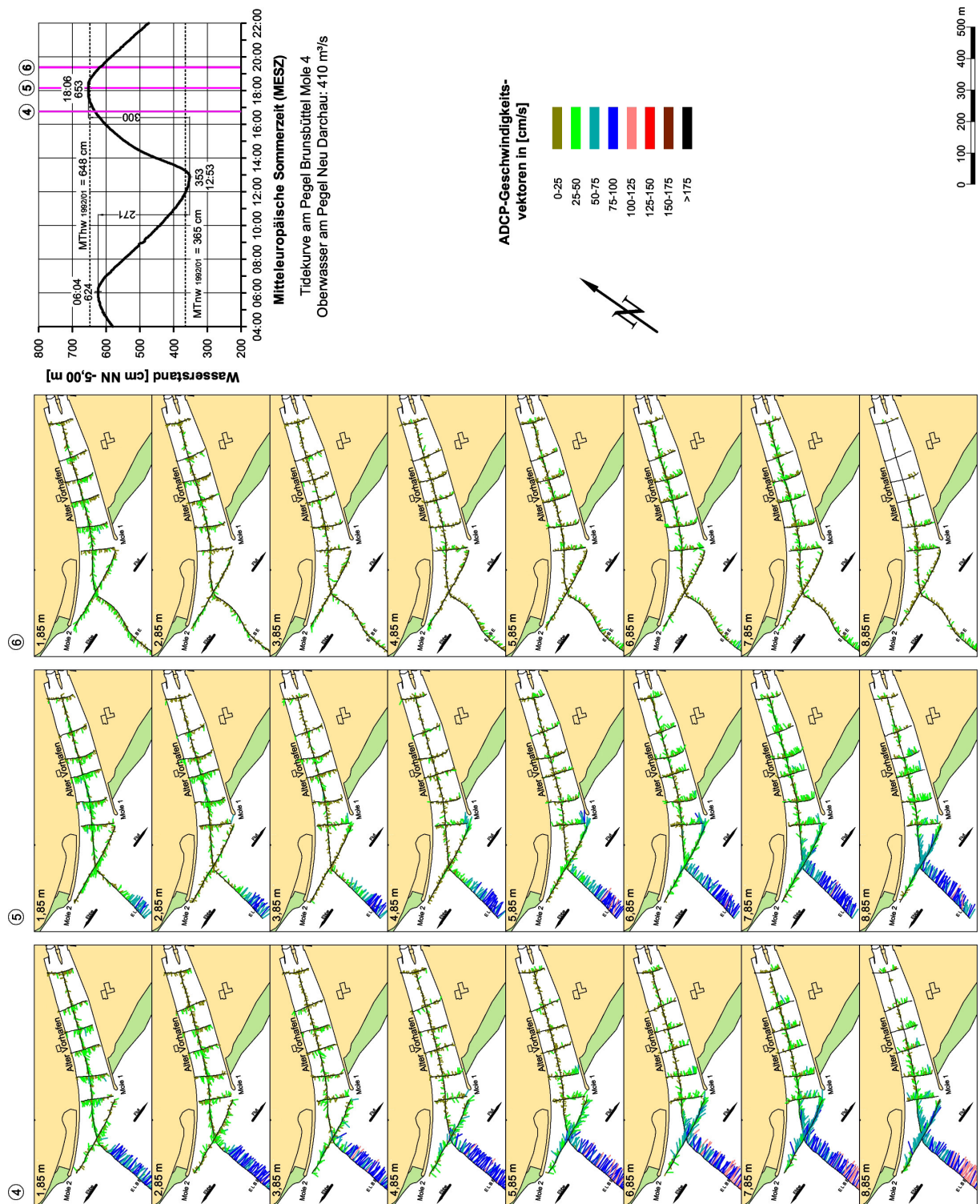


Abb. 128: Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 11.07.2005, zweite Flutphase

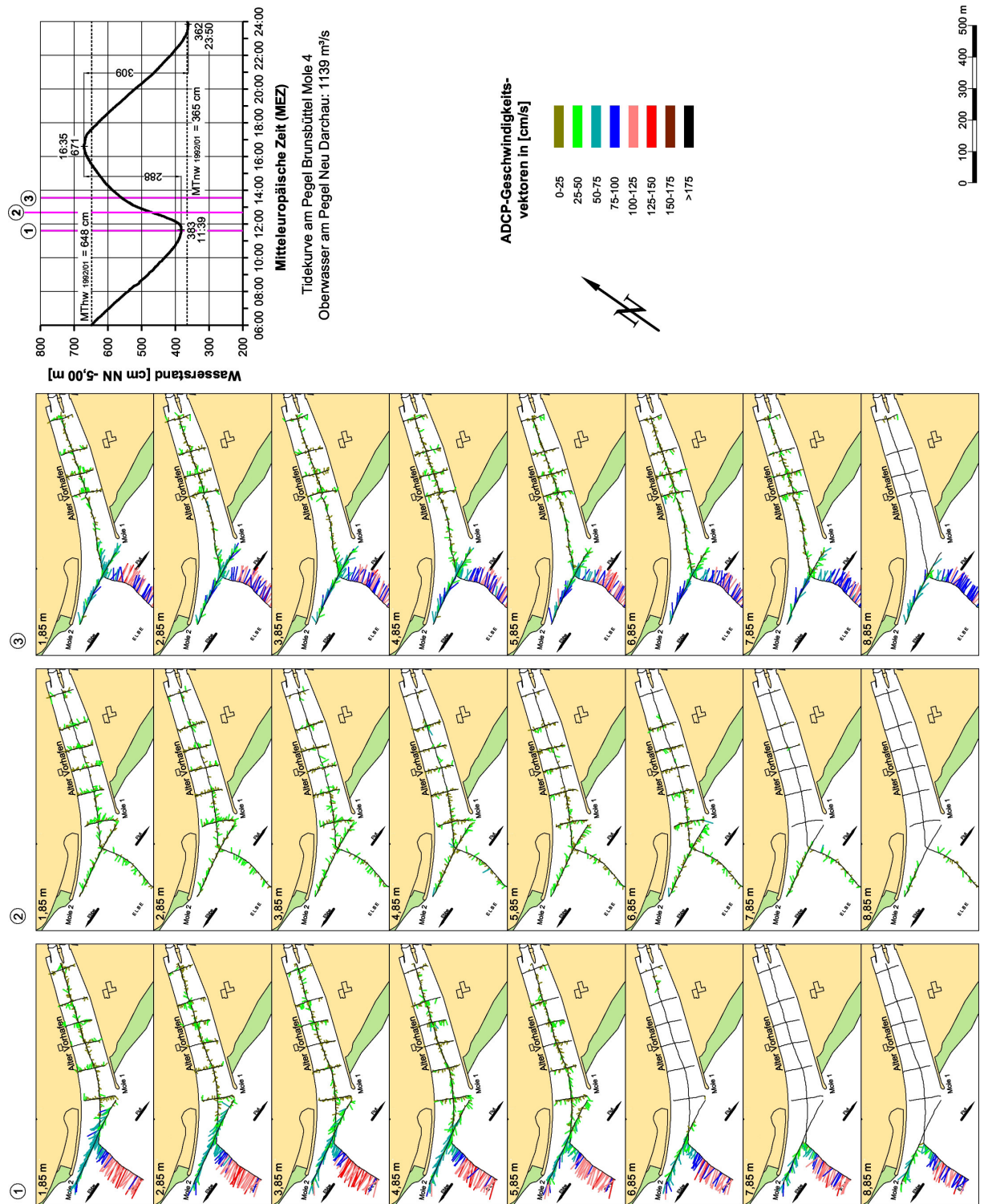


Abb. 129: Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 08.03.2007, erste Flutphase

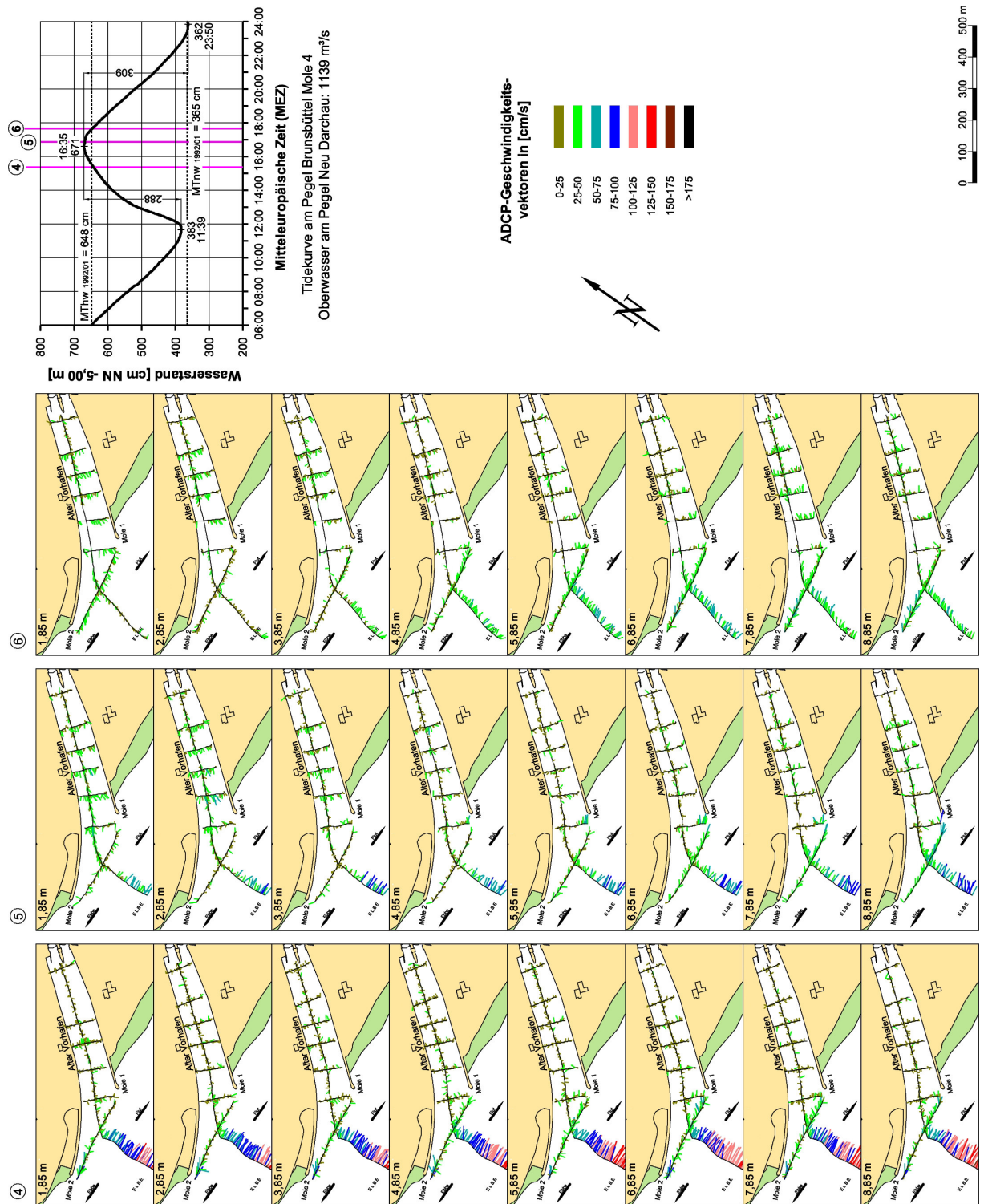


Abb. 130: Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 08.03.2007, zweite Flutphase

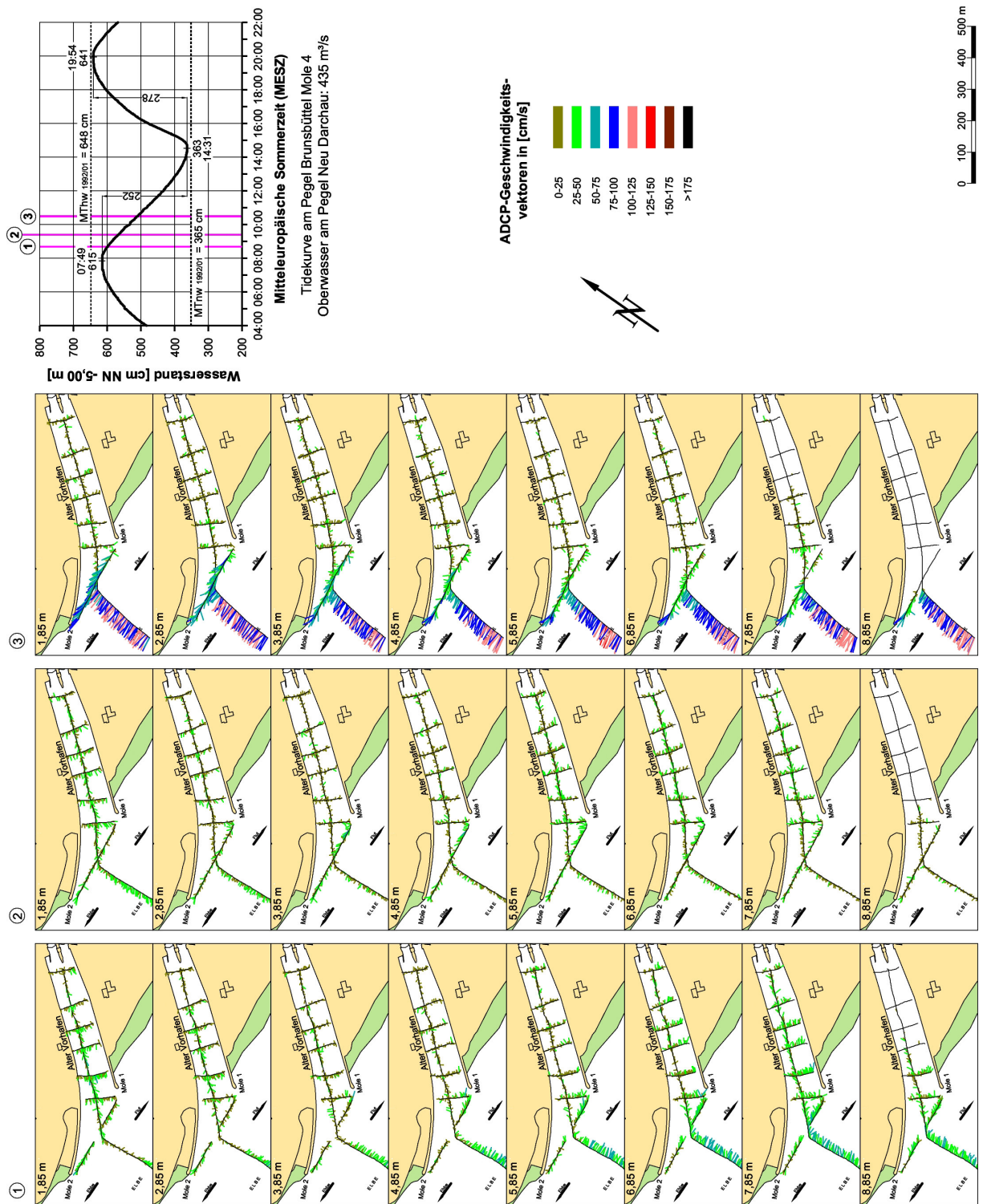


Abb. 131: Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 14.07.2005, erste Ebbephase

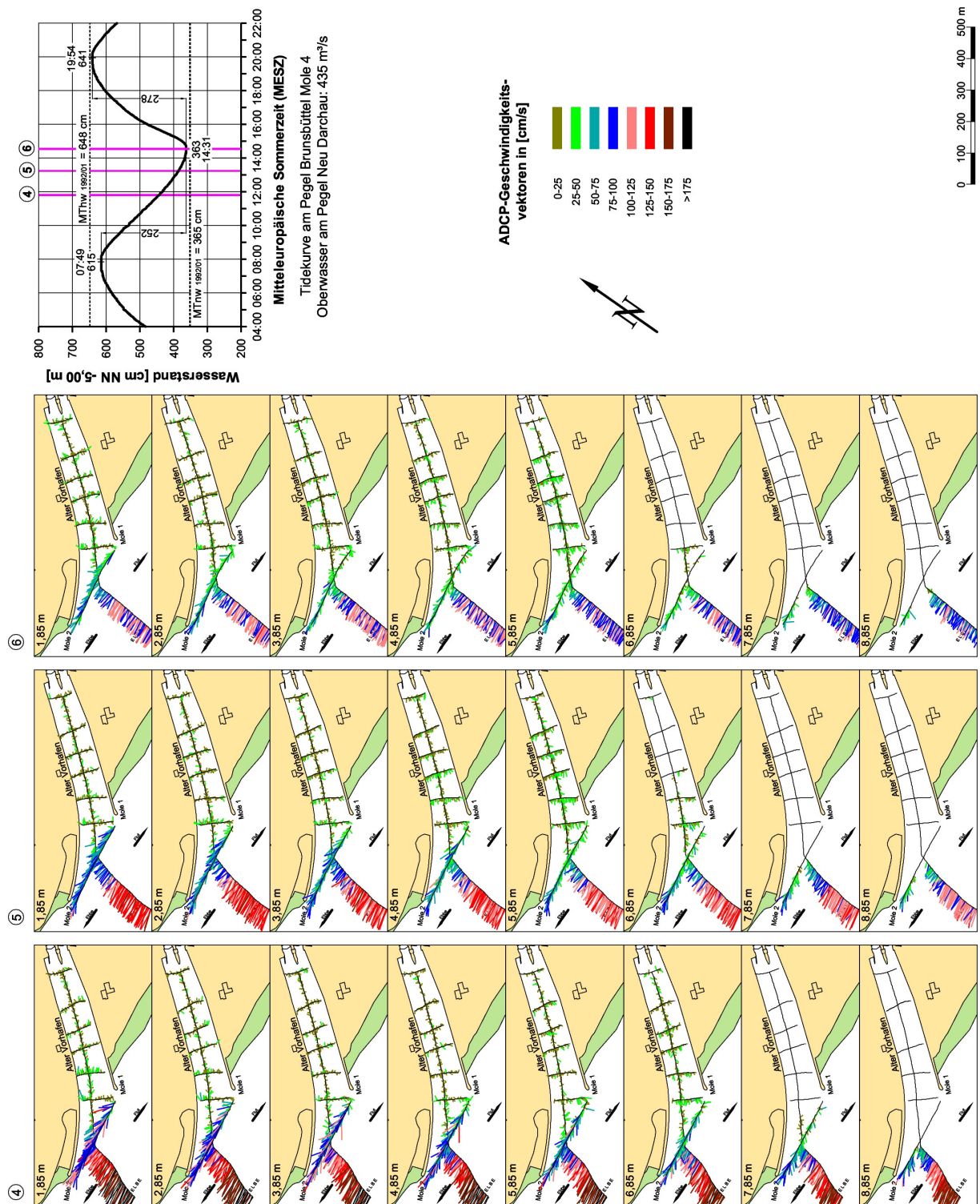


Abb. 132: Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 14.07.2005, zweite Ebbphase

Brackwasserzone bei höherem Binnenabfluss in Richtung Nordsee, was zusätzlich zur Minderung der Salzkonzentrationen in der Elbe bei Brunsbüttel führt.

Die vorstehenden Anmerkungen sind die Gründe für die bei der Märzmessung 2007 (Abb. 133 und 134) deutlich schwächer ausgeprägten Strömungs- und Dichteeffekte im Alten Vorhafen als im Juli 2005 (Abb. 131 und 132).

6.2.3 Salzgehalte

- **Messungen im Bereich des Neuen Vorhafens**

Am 7. Juli 2005 wurden die Salzgehalte im Neuen Vorhafen bei annähernd mittleren Tideverhältnissen und niedrigem Oberwasser am Pegel Neu Darchau ($Q_0 = 292 \text{ m}^3/\text{s}$) gemessen (Abb. 135). Die Salzkonzentrationen im Tidestrom (Pos. NV6) erhöhten sich während der Flutphase von rd. 4 ‰ (Messung 1) auf bis zu 13 ‰ bei der letzten Messung. Die Zufahrten zum Nord-Ostsee-Kanal liegen bereits bei niedrigen Abflüssen aus dem Binnenland mehr im mesohalinen Brackwasserbereich. Bei Tideniedrigwasser beträgt das horizontale Salzgehaltsgefälle vom inneren Vorhafen zur Elbe (Messung 1, NV1 bis NV6 in Abb. 135) $\Delta S \approx 2,5$ bis $3,5$ ‰. Der Strömungseffekt mit den im Uhrzeigersinn drehenden Walzen im Einfahrtsbereich hat die geringeren Salzgehalte im westlichen Vorhafenbereich (NV5 und NV4) im Vergleich zu Pos. NV1 bis NV3 zur Folge. Die Vertikalgradienten erklären die während der Ebbestromphase in den oberen Wasserschichten nach innen und im tieferen Wasser nach außen gerichteten Dichteströmungen. Das leichtere Elbewasser gelangt über die Walzenströmungen oben in den Vorhafen. Gleichzeitig fließt das salzigere Wasser unten aus dem Vorhafen.

Nach der 2. Messung kehren sich die Salzgehaltskonzentrationen zwischen Elbe und Vorhafen um (Abb. 135). Im weiteren Verlauf der Flutstromphase verstärkt sich das horizontale Salzgehaltsgefälle von der Elbe zu den Schleusen. Gleichzeitig bilden sich zunehmend stärkere Vertikalgradienten aus. Aus den Diagrammen ist abzulesen, wie der Wasseraustausch über die Flutstromwalzen im tieferen Wasser, in der Hafeneinfahrt stattfindet. Das wird durch die Salzgehaltsdifferenzen der Positionen NV3 und NV4 dokumentiert (ab Messung 4 in Abb. 135). Das salzigere Wasser aus der Elbe gelangt über die linksdrehenden Flutstromwalzen in den unteren Wasserschichten in den Vorhafen. Das weniger salzhaltige Wasser wird mit den Dichteströmungen oberflächlich aus den Vorhafen transportiert.

Typisch für die fortgeschrittene Flutstromphase sind die geringeren Salzgehalte und Horizontalgradienten in den oberen und die höheren in den unteren Wasserschichten im Vorhafen (Messungen 5 und 6 in Abb. 135).

Die Ebbmessungen wurden am 30. Juni 2005 bei vergleichbaren Oberwasserbedingungen ($Q_0 = 297 \text{ m}^3/\text{s}$) und einem Nipptidefall von 246 cm durchgeführt (Abb. 136). Der geringere Tidehub gegenüber der Flutmessung ist ursächlich für die insgesamt schwächeren Salzkonzentrationen in der Elbe. Zu Beginn der Messungen, während der Hochwasserphase, wurden im Tidestrom bis zu $S \approx 10$ ‰ ermittelt (Messungen 2) und bei der letzten Messung waren es noch $S \approx 2,5$ ‰. Die tideabhängigen horizontalen und vertikalen Salzgehaltsgradienten stimmen in

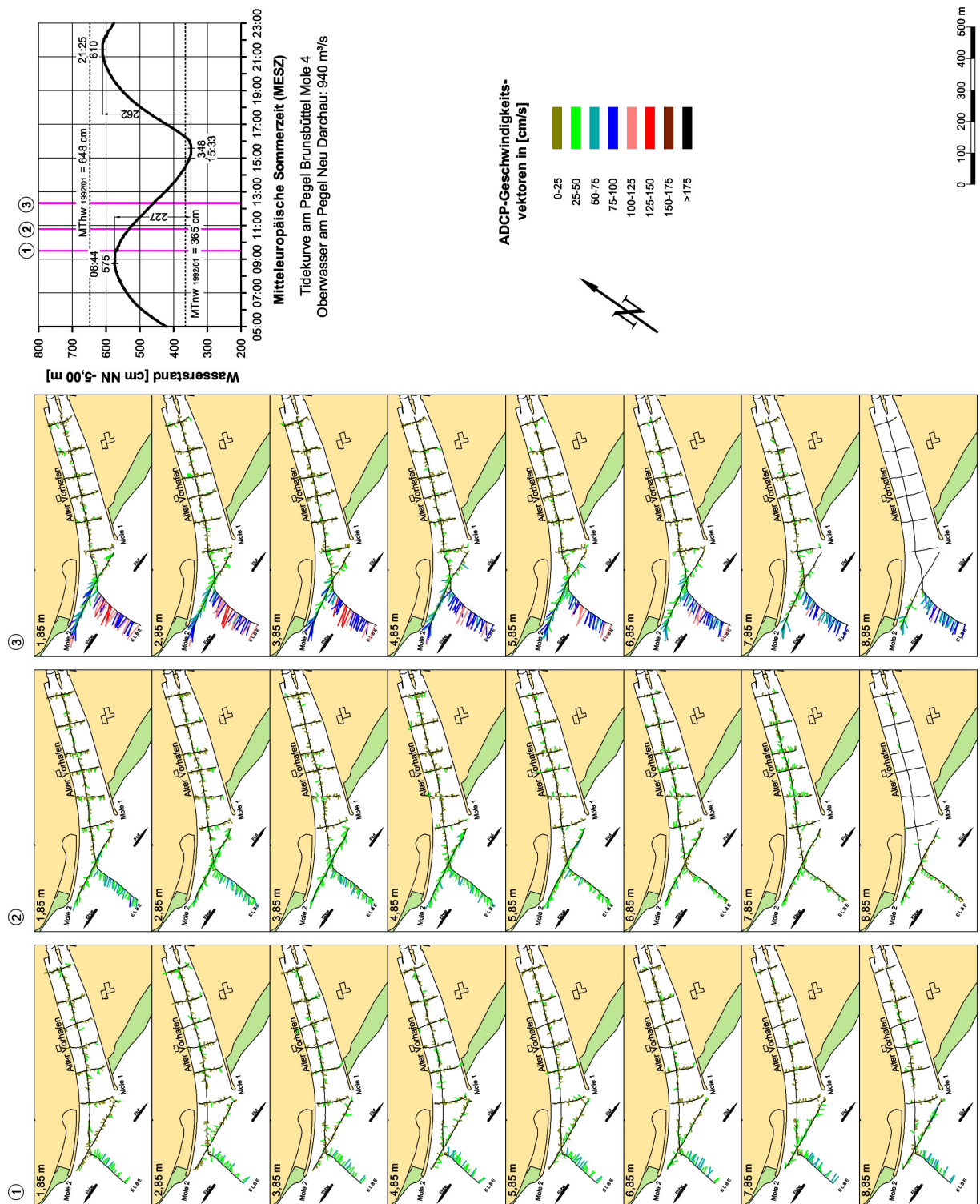


Abb. 133: Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 27.03.2007, erste Ebbephase

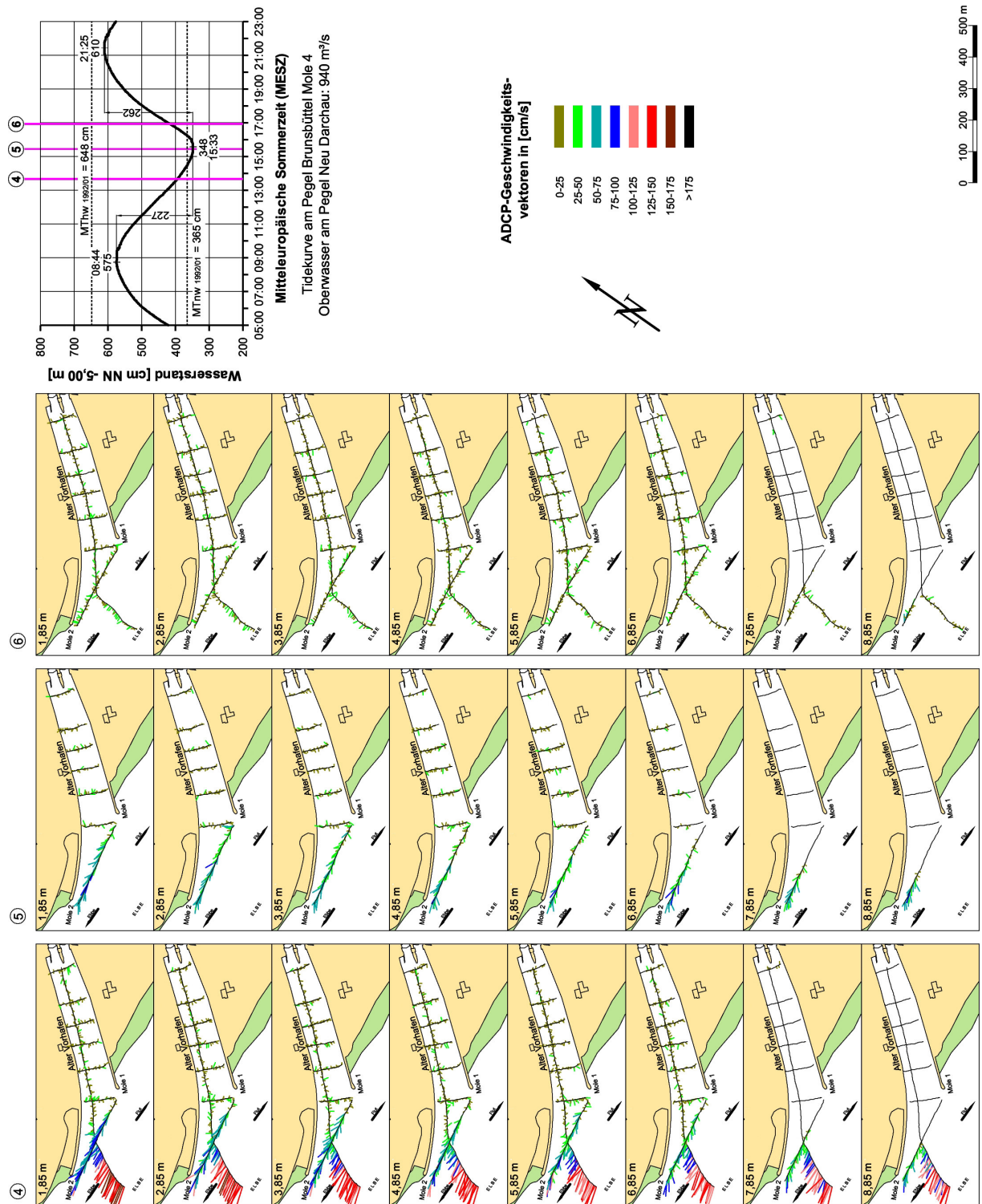


Abb. 134: Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 27.03.2007, zweite Ebbphase

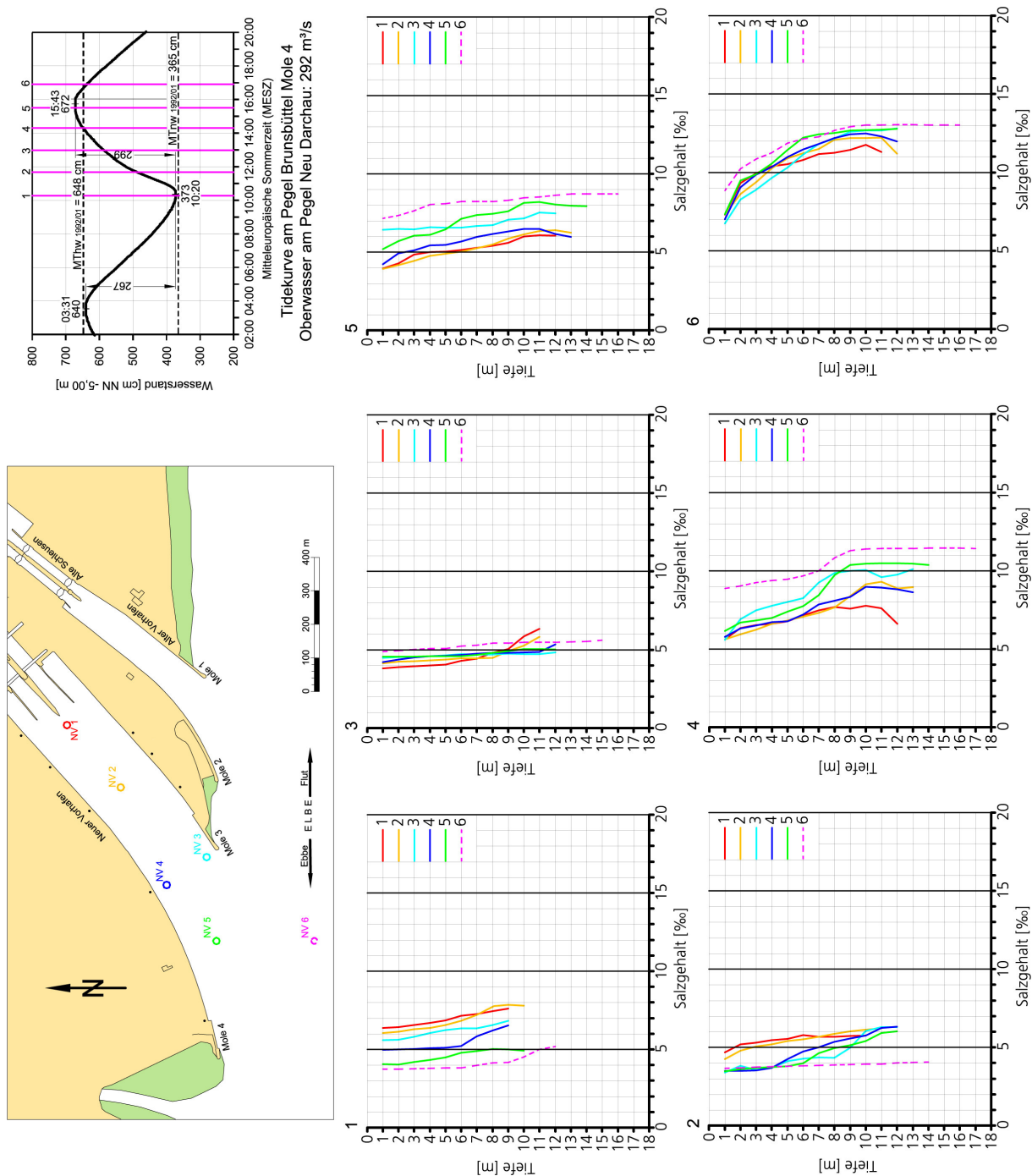


Abb. 135: Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 07.07.2005

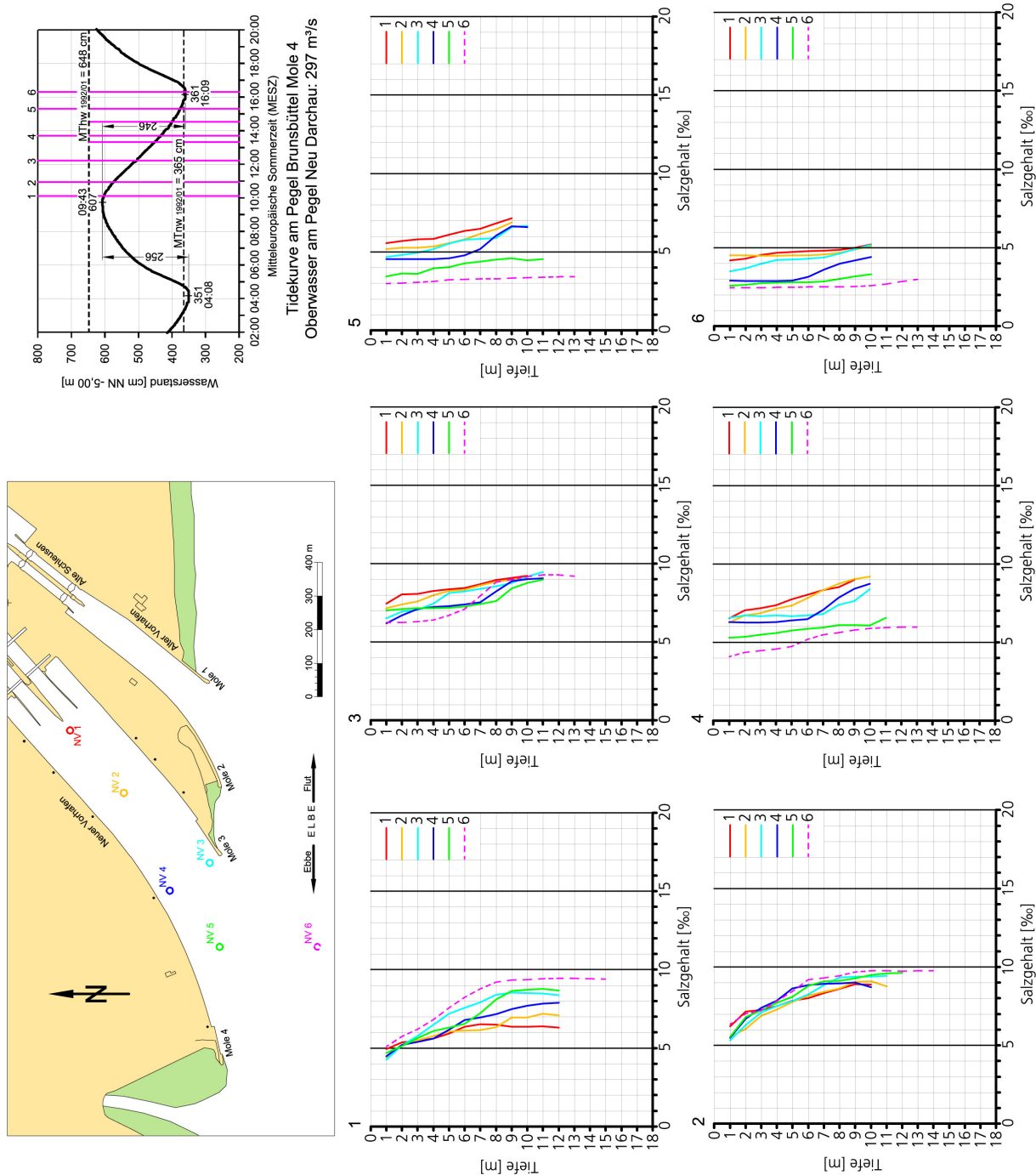


Abb. 136: Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Ebbemessung am 30.06.2005

der Hoch- und Niedrigwasserphase in ihrer Form mit der Flutmessung überein (vgl. Abb. 135). Die Umkehrung der Salzgehaltsgefälle findet ebenfalls etwa bei Tidehalbwasser jedoch über einen längeren Zeitraum statt und ist später abgeschlossen. In der zweiten Ebbephase prägen sich dann die ebbestromorientierten Strömungs- und Dichteeffekte aus. Das lässt sich an den Verteilungen der Salzgehalte ab der 4. Messung in Abb. 136 erkennen.

In der Ebbestromphase wird die während der Flutstromphase aufgelaufenen Tidewassermenge zusammen mit dem während der Tide anfallenden Oberwasser in Richtung Nordsee transportiert. Das spezifisch leichtere, salzärmere Wasser fließt verstärkt in den oberen Wasserschichten ab (Vertikalverteilung Profil NV6, Messungen 3 und 4 in Abb. 136). Dadurch wird die in den oberen Schichten rechtsdrehende Ebbestromwalze in der Einfahrt angefacht (Profil NV4 und NV5, Messungen 3 bis 6 in Abb. 136). Von der Walze aus ziehen die Dichteströmungen oben in den Hafen. Sie werden an den Außenhäuptern der Schleusen gekehrt, so dass im tieferen Wasser die Strömung zur Elbe gerichtet ist. Der dadurch verursachte Wasseraustausch zwischen Vorhafen und Elbe führt zeitverzögert zur Abnahme der Salzkonzentrationen im inneren Vorhafenbereich (Positionen NV2 und NV1, Messungen 3 bis 6 in Abb. 136).

Die Flutmessungen am 7. März 2007 wurden bei erhöhtem Oberwasser $Q_o = 1061 \text{ m}^3/\text{s}$ und einem Tidehub von 316 cm ausgeführt (Abb. 137). Wegen der höheren Binnenabflüsse (Abb. 98) hatte sich die Brackwasserzone der Elbe seewärts verlagert. Im Tidestrom wurden nur geringe, überwiegend dem oberen, oligohalinen Brackwasser zuzuordnende Salzgehalte zwischen 0,5 und 5 ‰ gemessen.

Zum Eintritt des Tideniedrigwassers wurde im Staubereich der Ebbeströmungen (Position NV4) der stärkste Vertikalgradient mit $\Delta S \approx 1,5 \text{ ‰}$ registriert (Messung 1). Bis zur dritten Messung hatten sich die Salzgehalte an allen Positionen bei einer Salzkonzentration von $S \approx 1 \text{ ‰}$ ausgeglichen. Deutlich höhere Salzgehalte sowie horizontale und vertikale Gradienten hatten sich erst zum Eintritt des Tidehochwassers eingestellt. Etwa eine Stunde nach Thw war der Salzgehalt in der Elbe bis zu $S = 6,5 \text{ ‰}$ angestiegen. Bemerkenswert sind die Unterschiede in der Hafeneinfahrt (NV3 und NV4, Messungen 5 und 6 in Abb. 137) und das stärkere horizontale Gefälle zwischen der Elbe und dem inneren Vorhafen in den unteren Wasserschichten gegenüber der Messung vom Juli 2005 (Abb. 135).

Mit der Ebbemessung in Abb. 138 wird dokumentiert, dass das Untersuchungsgebiet bei erhöhtem Binnenabfluss zur Nipptidezeit auch bei Thw nur von oligohalinem Brackwasser mit Konzentrationen von $S < 2,5 \text{ ‰}$ erreicht wird. Die stärksten horizontalen und vertikalen Gradienten der Salzverteilungen traten wie bei der Flutmessung erst nach Thw bis zur Flutstromkenterung auf. Während der Ebbestromphase waren die Salzgehalte an allen Messpunkten etwa gleich niedrig bei nur geringfügigen Änderungen. Es ist noch anzumerken, dass die in Abb. 138 aufgetragenen Salzgehalte 4 Tage nach dem Durchgang der Oberwasserspitze von $Q_{o_{max}} = 1270 \text{ m}^3/\text{s}$ in Neu Darchau (vgl. Abb. 98) gemessen wurden.

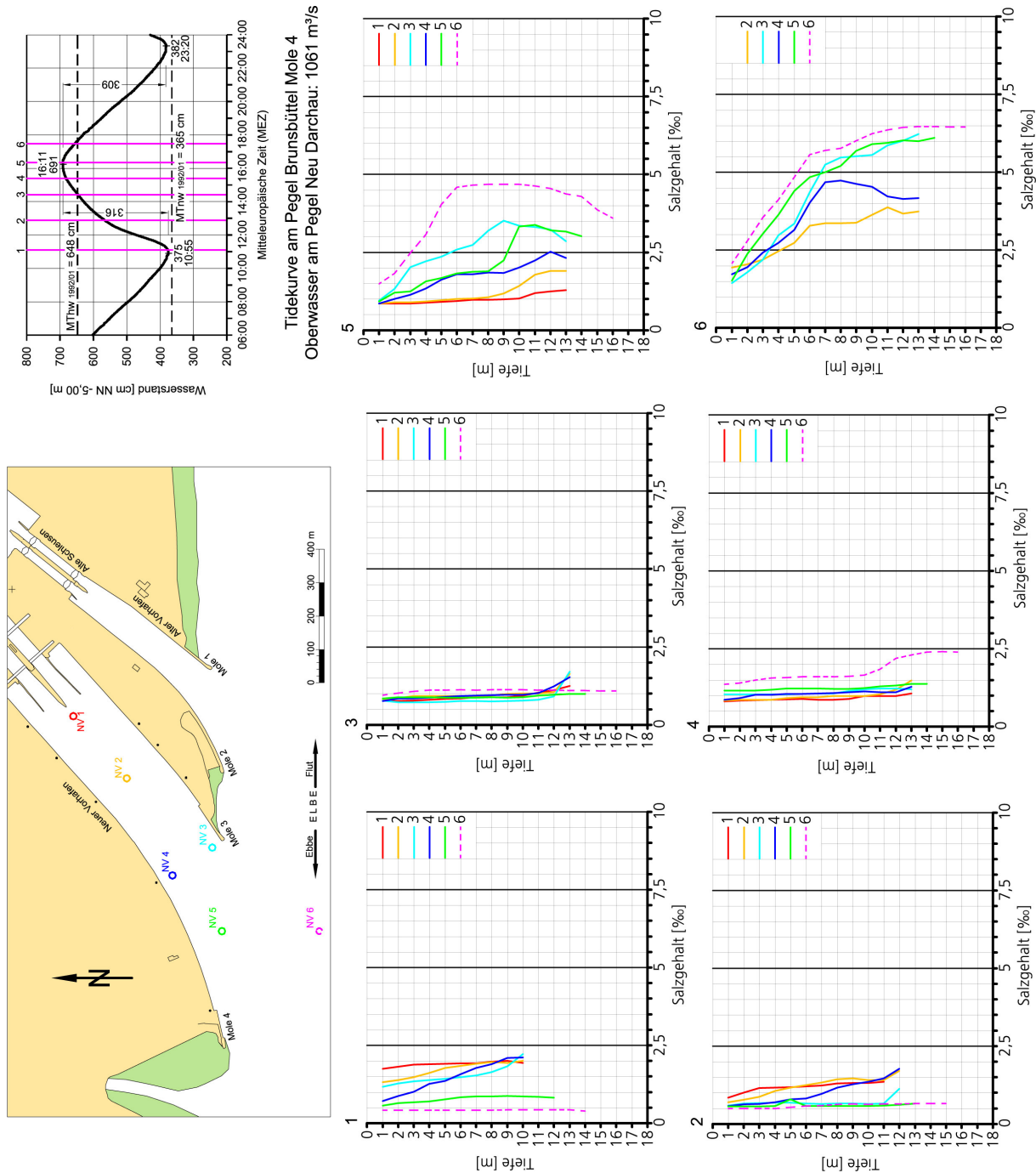


Abb. 137: Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 07.03.2007

• Messungen im Bereich des Alten Vorhafens

Die Flutmessungen im Alten Vorhafen am 11. Juli 2005 (Abb. 139) wurden bei ähnlichen Tide- und Oberwasserbedingungen durchgeführt wie die Salzgehaltsmessungen im Bereich des Neuen Vorhafens 4 Tage zuvor (vgl. Abb. 135). Ein Vergleich der Messungen zeigt ganz ähnliche Verhaltensmuster bei den tideabhängigen Salzgehalten. Die vorstehenden Erläuterungen zu den Untersuchungsergebnissen im Bereich des Neuen Vorhafens sind auf den Alten Vorhafen übertragbar.

Die Ebbmessungen am 14. Juli 2005 im Alten Vorhafen (Abb. 140) wurden ebenfalls bei etwa gleichen hydrologischen Randbedingungen durchgeführt wie die Untersuchungen im Neuen Vorhafen am 30. Juni 2005 (Abb. 136). Wie bei den Flutmessungen sind die tideabhängigen Salzkonzentrationen im Bereich der beiden Vorhäfen miteinander vergleichbar. Die Salzkonzentrationen in den Vorhäfen folgen phasenverschoben denen in der Elbe. In den Tidehochwasserphasen sind die Salzgehalte in der Elbe stärker als in den Vorhäfen. In der zweiten Ebbestromphase bis nach Thw ist es umgekehrt. Die horizontalen und vertikalen Salzgradienten erklären die sich mit der Tide umkehrenden Walzen- und Dichteströmungen in den Vorhäfen.

Die am 8. März 2007 im Bereich des Alten Vorhafens bei erhöhtem Oberwasser durchgeführten Salzgehaltsmessungen während der Flutstromphase (Abb. 141) bestätigen ebenfalls die Ergebnisse des Vortages im Neuen Vorhafen (vgl. Abb. 137). In der ersten Flutphase wurden in der Elbe nur sehr geringen Salzgehalte von $S < 1 \text{ ‰}$ registriert. Nennenswerte Gradienten traten erst ab dem Eintritt des Tidehochwassers ein. Das größte Gefälle zwischen der Elbe und den Außenhäuptern wurde in der Stunde nach Thw beobachtet. In der Elbe wurden Salzgehalte bis zu $S \approx 5 \text{ ‰}$ erreicht (Abb. 141, Messung 6).

Die bei Nipptide am 27. März 2007 ausgeführten Messungen (Abb. 142) bestätigen, dass Brunsbüttel bei Oberwasserabflüssen von $Q_0 \approx 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ im oberen Bereich der Brackwasserzone liegt. Wie bei der Messung im Bereich des Neuen Vorhafens (vgl. Abb. 138) betrugen die maximalen Salzgehalte in der Elbe nach Thw $S < 3 \text{ ‰}$ und während der Niedrigwasserphasen lediglich $S \approx 0,5 \text{ ‰}$. Auch die Salzgehaltsgefälle waren nur schwach ausgeprägt.

Im Vergleich der beiden Vorhäfen zeigt sich wie in Bremerhaven, dass geringere Abmessungen und Ausbautiefen einer Schleusenzufahrt kleinere tideabhängige Salzgehaltsgefälle und damit auch schwächere Dichteströmungen zur Folge haben.

6.2.4 Schwebstoffe

• Messungen im Bereich des Neuen Vorhafens

Die neuen Schleusen des Nord-Ostsee-Kanals werden jährlich von etwa vierzig- bis fünfzigtausend Seeschiffen passiert. Durchschnittlich sind das täglich mehr als hundert Schiffe. Die Zuflüsse zum Nord-Ostsee-Kanal werden bei Bedarf über die Schleusen des Alten Vorhafens in die Elbe entwässert. Die Abflüsse betragen dabei bis zu 600 bis 700 m^3/s , was etwa dem mittleren Oberwasser der Elbe entspricht. Die natürlichen hydrodynamischen und morphologischen Vorgänge in den Schleusenvorhäfen werden also erheblich von den betrieblichen Vorgängen überlagert.

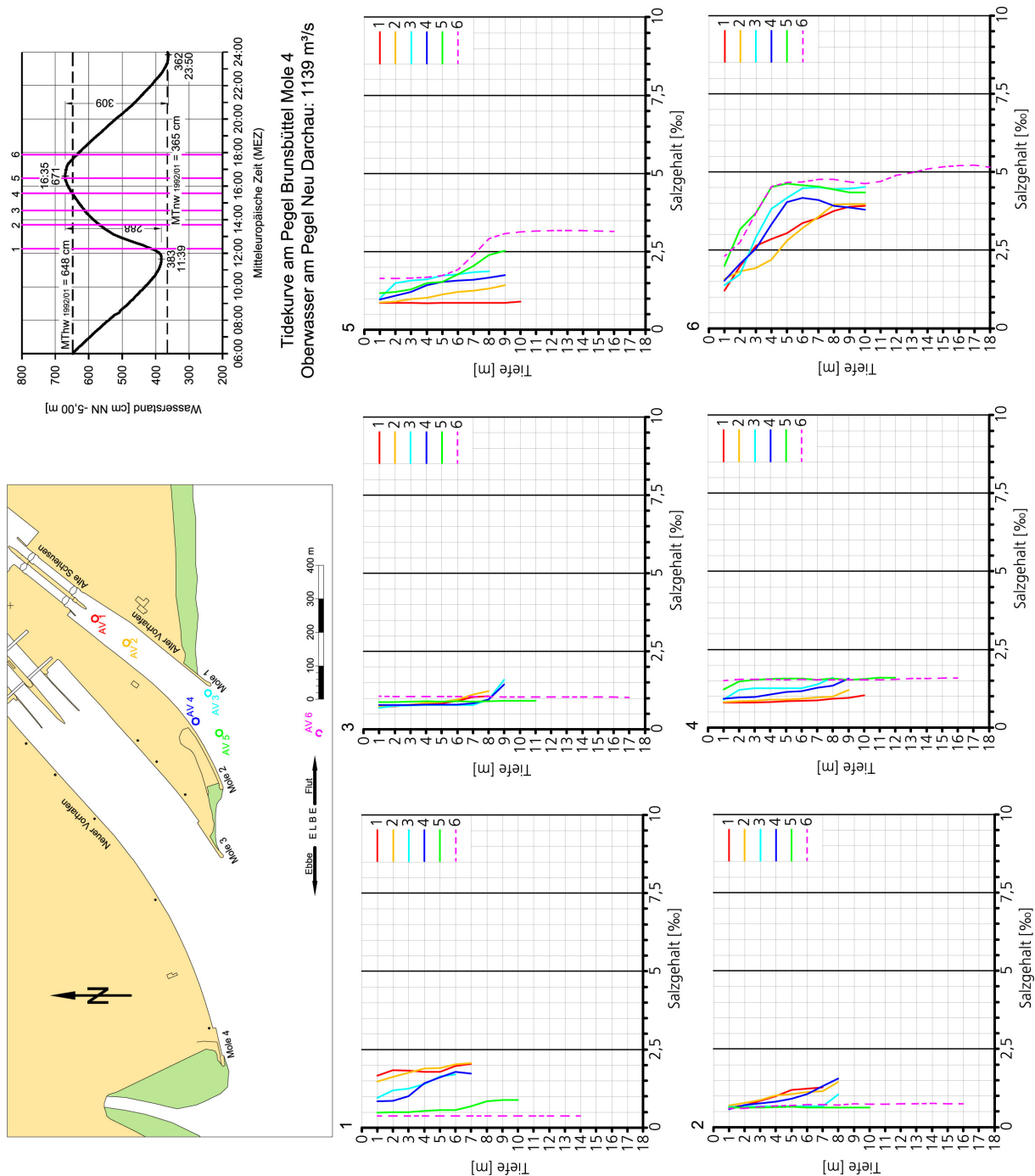


Abb. 141: Salzgehalte im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 08.03.2007

Die Salzgehalts- und Schwebstoffmessungen wurden gleichzeitig mit einer Multifunktionssonde ausgeführt. Die bei mittleren Tideverhältnissen und geringen Binnenabflüssen getätigten Messungen 1 und 2 weisen bei der Flut vom 7. Juli 2005 relativ geringe Schwebstoffkonzentrationen auf (Abb. 143). Die sich nach Tidehalbwasser ausprägenden Dichte- und Walzenströmungen remobilisieren die feinen Sedimente im Vorhafen und verursachen dort höhere Schwebstoffkonzentrationen als in der Elbe (Messung 3). Überlagert wird das natürliche Geschehen durch die betrieblichen Vorgänge. Die Schwebstoffmengen sind innerhalb der Flutstromwalzen im äußeren Vorhafen am größten und vermindern sich nach innen (z. B. Messungen 3 bis 5 in Abb. 143).

Wie bei den Brackwasserhäfen an der Ems und Weser zeigte sich auch in Brunsbüttel, dass während der Ebbestromphase weniger Sedimente mobilisiert werden (Abb. 144). Es bleibt festzustellen, dass die positive Feststoffbilanz durch den Sedimenteintrag mit den Walzen- und Dichteströmungen während der Flutstromphase verursacht wird. Bemerkenswert sind die etwas höheren Schwebstoffkonzentrationen in der späteren Ebbestromphase bei der 4. und 5. Messung im Stau- und Walzenbereich der Ebbeströmungen (Pos. NV5 und NV4 in Abb. 144).

Während der Flutmessungen am 7. März 2007 wurden gleichzeitig im Neuen Vorhafen Unterhaltungsarbeiten mit einem Hopperbagger durchgeführt. Das Baggergut wurde unterhalb der Schleusenzufahrten auf der rechten Elbeseite außerhalb des Fahrwassers umgelagert. Die Auftragungen in Abb. 145 zeigen im Tidestrom und Vorhafen deutlich höhere Schwebstoffkonzentrationen bis in die oberen Wasserschichten als bei der Messung vom Juli 2005 (vgl. Abb. 143). Das ist sicher nicht allein auf den Springtidehub und die höhere Oberwasserführung sondern vielmehr auf die Baggeraktivitäten zurückzuführen.

Bei einem Vergleich der Ebbemessungen vom 15. März 2007 und 30. Juni 2005 (Abb. 146 und 144) sind 2007 ebenfalls höhere Schwebstoffkonzentrationen zu verzeichnen. Nach den Aufzeichnungen im Messprotokoll ist das ebenfalls auf Unterhaltungsbaggerungen im Neuen Vorhafen zurückzuführen.

• Messungen im Bereich des Alten Vorhafens

Die tideabhängige Schwebstoffverteilung während der Flutstromphase im Bereich des Alten Vorhafens (Abb. 147) zeigt einen ähnlichen Verlauf, wie im neuen Vorhafen (vgl. Abb. 143). Bis Tidehalbwasser sind die Schwebstoffkonzentrationen relativ gering. Anschließend erhöhen sich die Werte zunächst an den äußeren Positionen 3 und 5 (Abb. 147 Messung 3). Danach verstärken sich die Feststoffgehalte auch bei Pos. 4 bis in die höheren Bereiche der Wassersäule.

Bei der Ebbemessung vom 14. Juli 2005 (Abb. 148) wurden insgesamt geringere Schwebstoffkonzentrationen festgestellt als bei der vorausgegangenen Flutmessung (vgl. Abb. 147). Die höheren Werte vor den Außenhäuptern (Pos. AV1) bei der 5. Messung sind auf die in der Zeit durchgeführten Niedrigwasserschleusungen zurückzuführen.

Während der Flutmessung vom 8. März 2007 wurden die natürlichen Randbedingungen ebenfalls durch Unterhaltungsarbeiten im Neuen Vorhafen mit Umlagerungen in der Elbe und den Schleusenbetrieb überlagert. Die ersten beiden Messungen in Abb. 149 zeigen, wie die Sedimente durch die Niedrigwasserschleusungen bis in die oberen Wasserschichten gelangen. Bemerkenswert

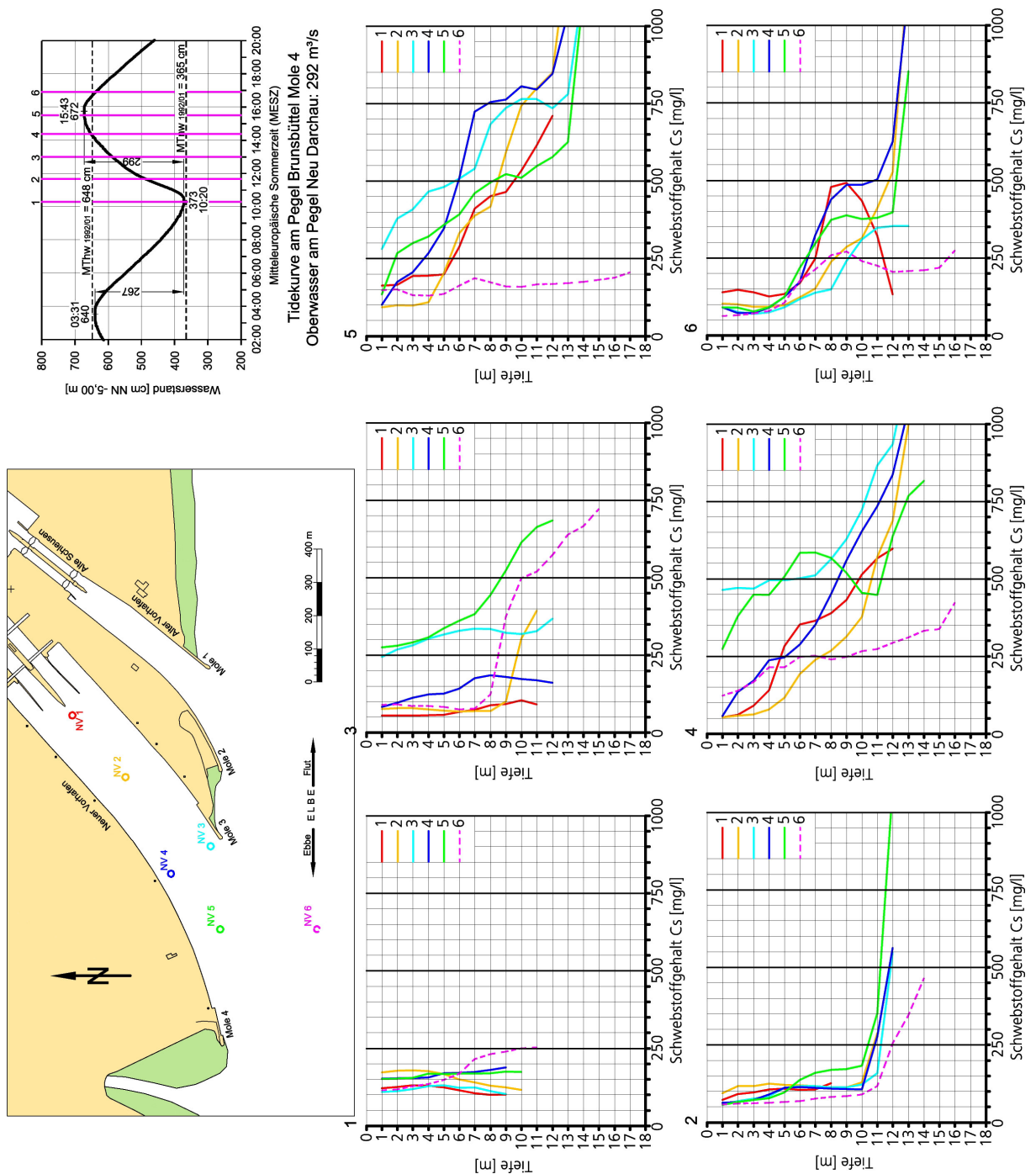


Abb. 143: Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 07.07.2005

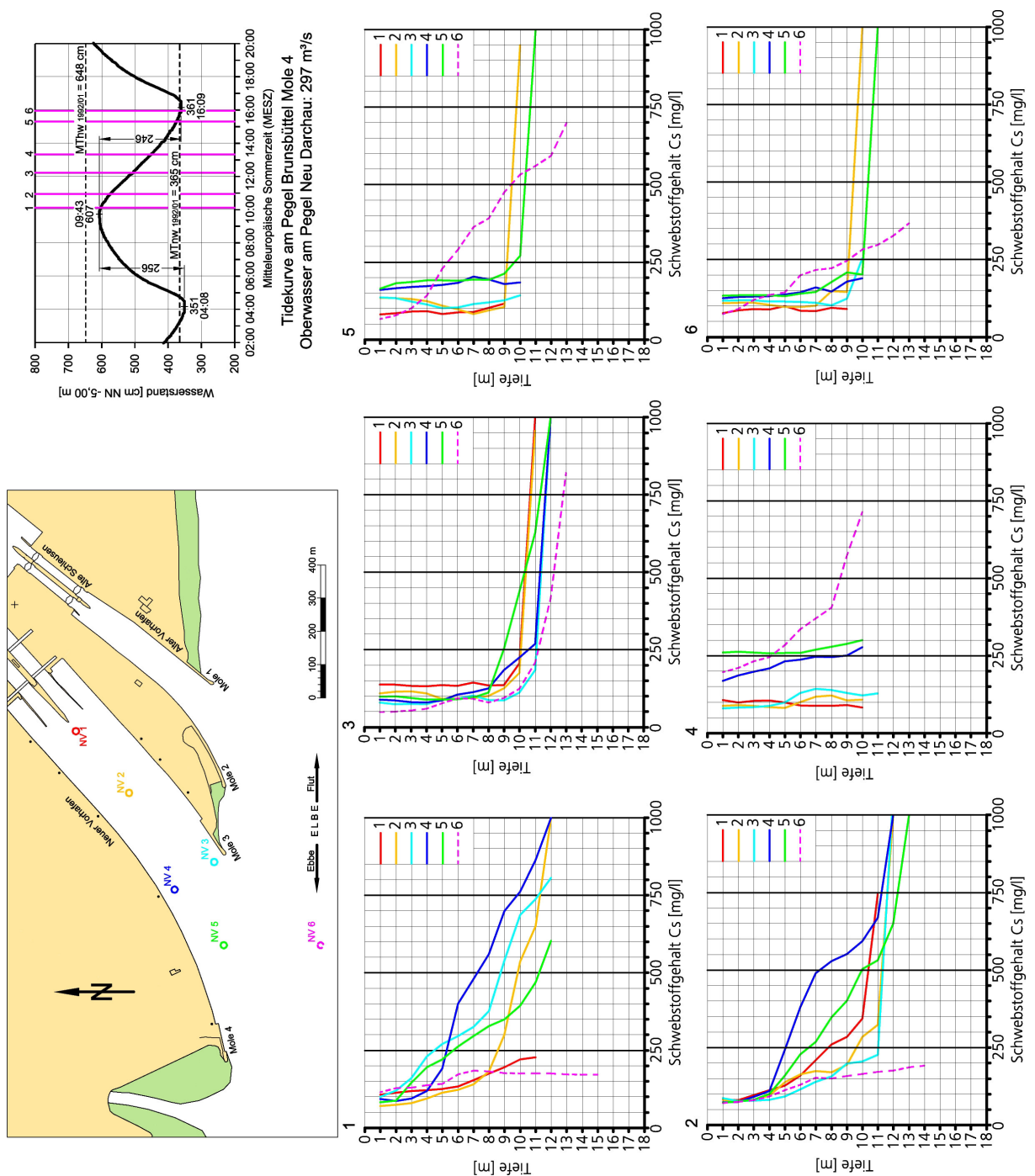


Abb. 144: Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Ebbemessung am 30.06.2005

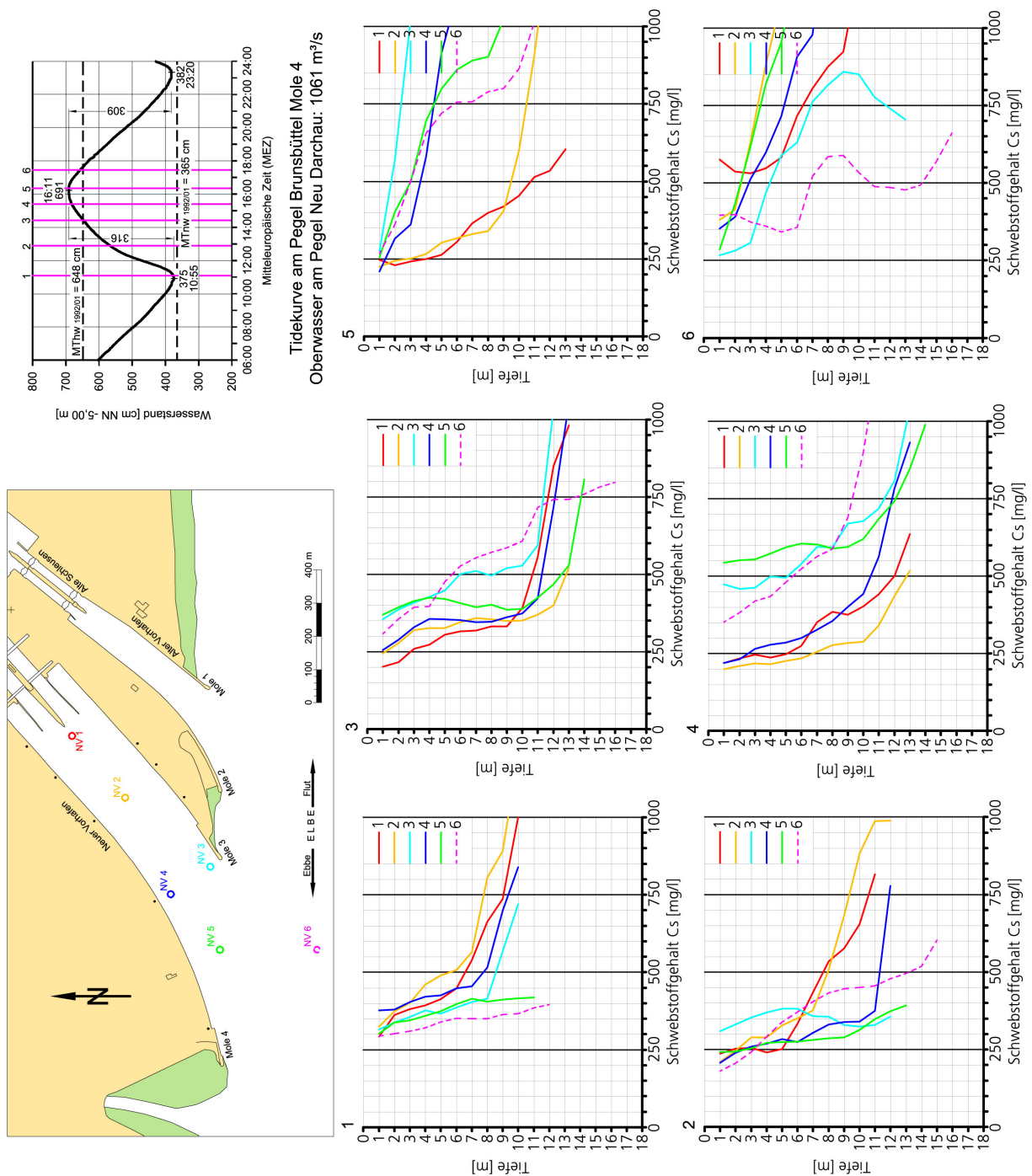


Abb. 145: Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 07.03.2007

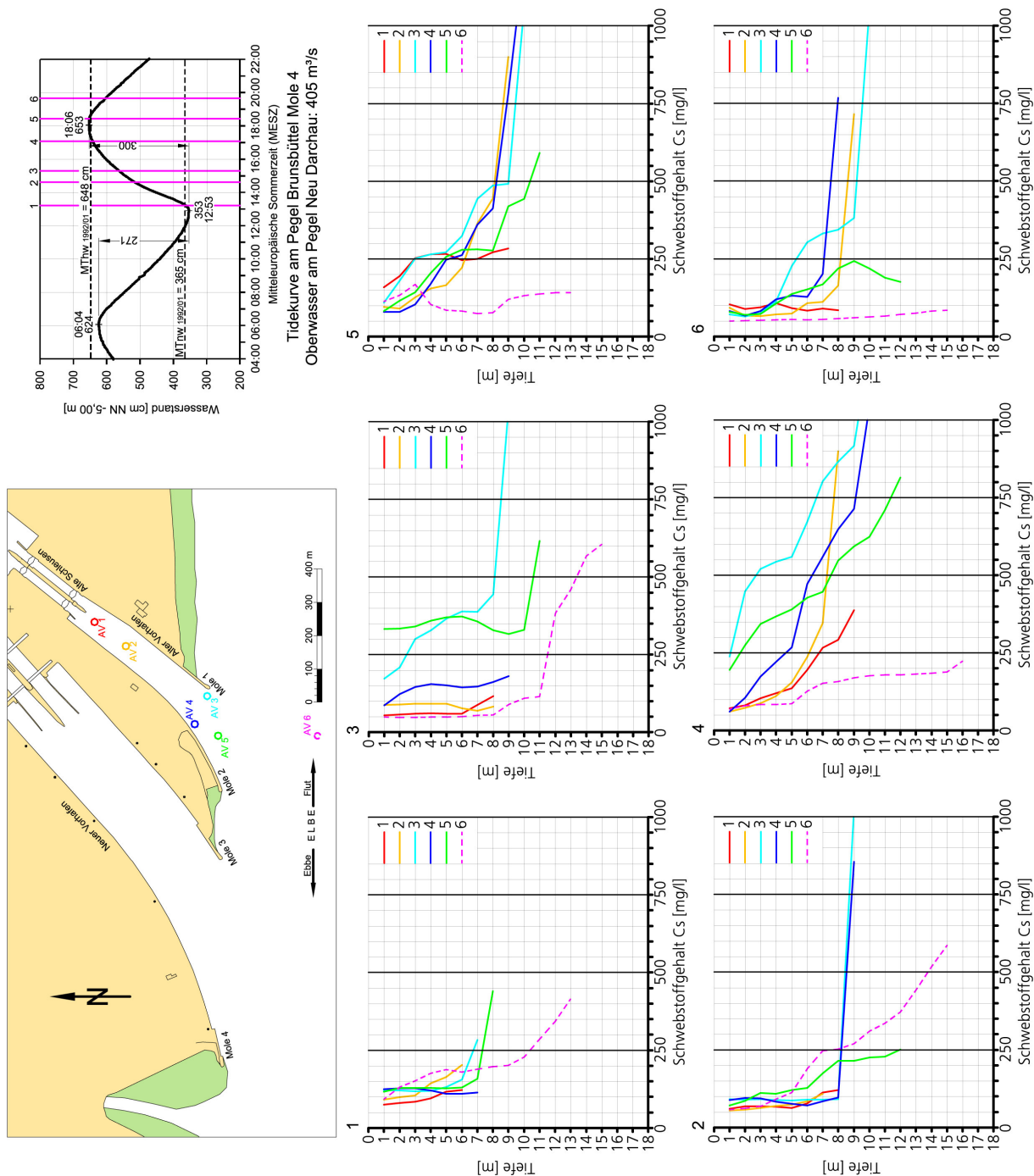


Abb. 147: Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 11.07.2005

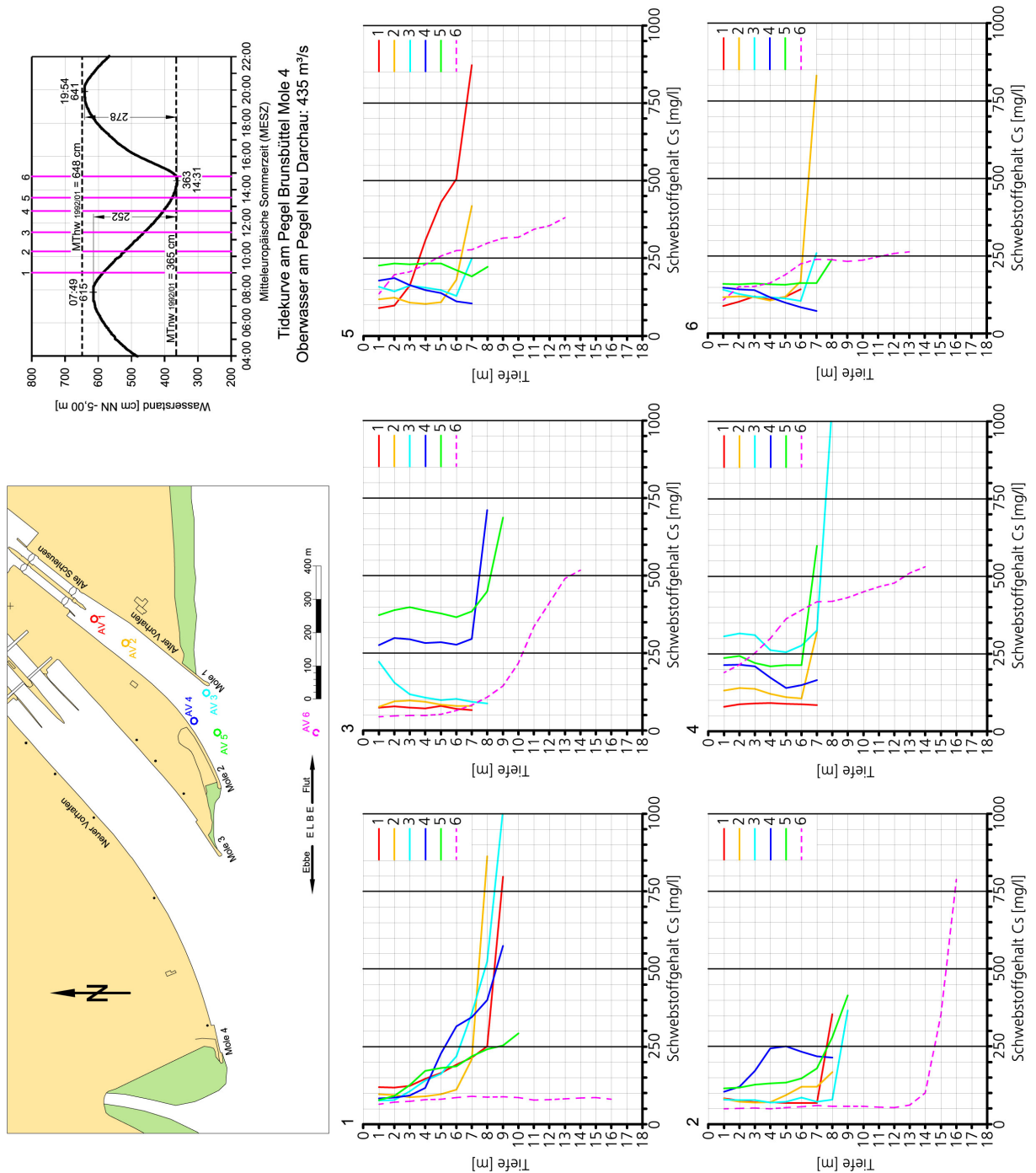


Abb. 148: Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel, Ebbemessung am 14.07.2005

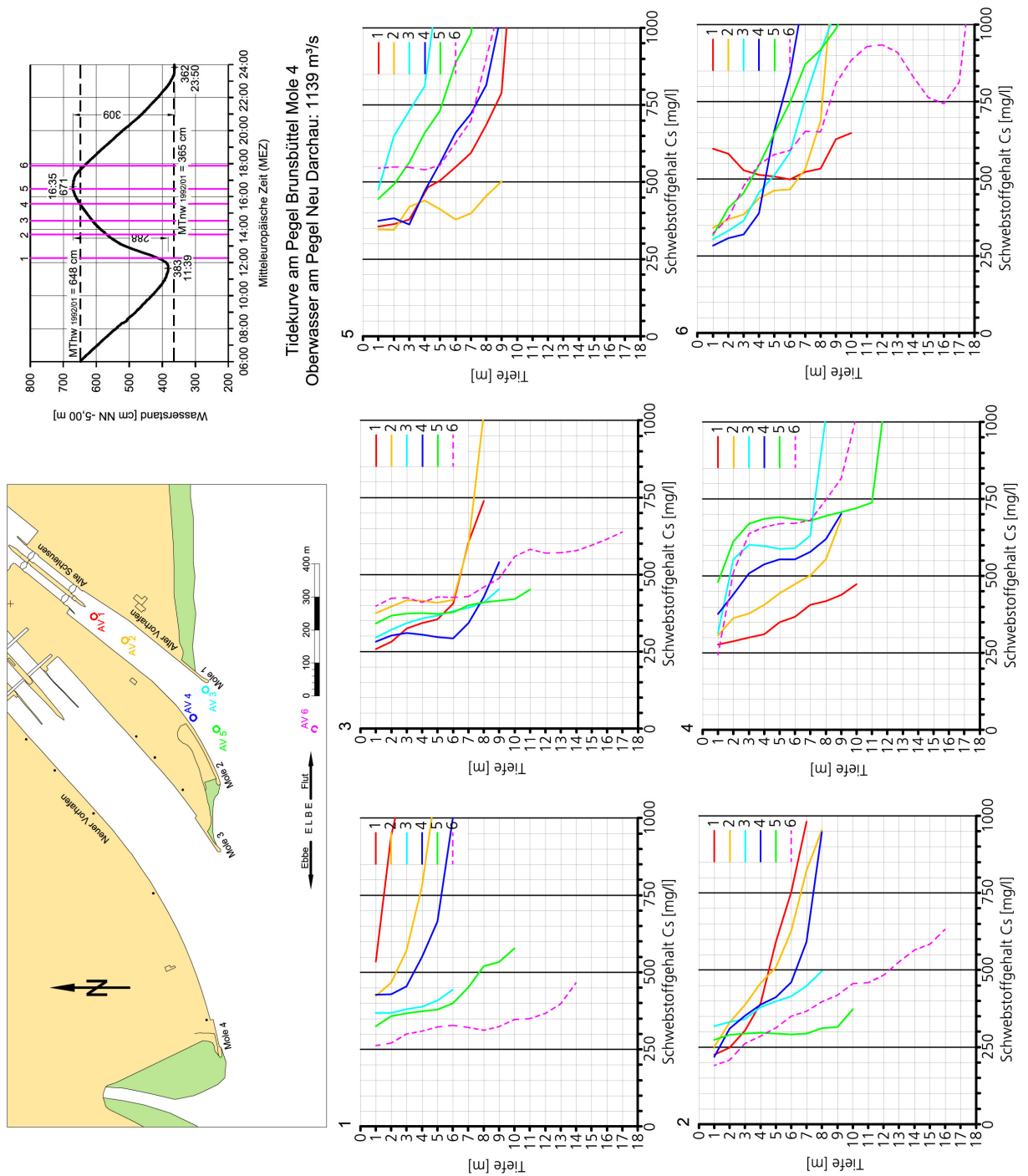


Abb. 149: Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 08.03.2007

ist auch die 4. Messung bei der die durch Umlagerungen des Baggerguts erhöhten Feststoffkonzentrationen in die Flutstromwalze der Vorhafeneinfahrt eingetragen werden.

Auch am 27. März 2007 war reger Schleusenbetrieb zu verzeichnen. Insgesamt gesehen waren die Schwebstoffkonzentrationen im Vorhafen deutlich höher als in der Elbe (Abb. 150). Auffällig sind die höheren Werte und starken Durchmischungen bis zur Wasseroberfläche im inneren Vorhafen bei den Niedrigwassermessungen (ab Messung 4 in Abb. 150). Sie sind mit Sicherheit auf betriebliche Ursachen wie Schleusungen bzw. Entwässerungen zurückzuführen.

7 Zusammenfassende und ergänzende Betrachtungen zu den in situ Messungen

Mit den Ergebnissen der Strömungs-, Salzgehalts- und Trübungsmessungen wurden vorstehend die komplizierten, tideabhängigen Gegebenheiten in den Tideströmen und Hafenzufahrten erörtert.

Im Mündungsgebiet der norddeutschen Tideflüsse überwiegt der stromauf gerichtete und oberhalb der Brackwasserzone der stromab gerichtete Geschiebetransport. Innerhalb der Durchmischungszone von Salz- und Süßwasser gibt es einen „Gleichgewichtspunkt“. Die Brackwassererscheinungen verstärken die Flutstromgeschwindigkeiten und schwächen die Ebbestromgeschwindigkeiten an der Flusssohle. Bei den Oberflächengeschwindigkeiten ist es umgekehrt (Abb. 151). Das hat zur Folge, dass der Gleichgewichtspunkt der Geschiebebewegung in den Tideflüssen

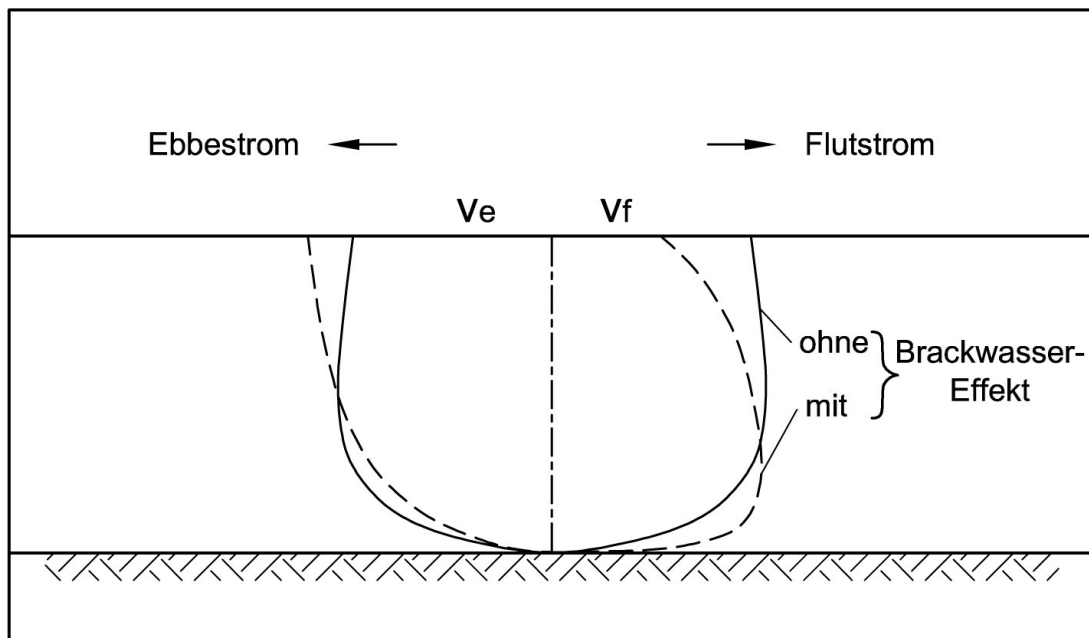


Abb. 151: Strömungsgeschwindigkeiten ohne und mit Brackwassereffekt (nach HENSEN, 1963)

durch den Brackwassereffekt stromauf verschoben wird (HENSEN, 1941).

Die aus den ADCP-Messungen berechneten Vertikalprofile der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten in den Fahrrinnen, haben für die Weser und Ems starke, brackwasserbedingte Auswirkungen auf die Strömungsprofile ergeben. Vor den mehr im oberen Brackwasserbereich der Unterelbe gelegenen Schleusen des Nord-Ostsee-Kanals sind die Einflüsse des Salzwassers auf die Tideströmungen geringer.

Ergänzend zu den Vertikalprofilen sind in den verschiedenen Revieren die tideabhängigen Änderungen der mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten in den Fahrrinnen und angrenzenden Querschnittsbereichen berechnet worden. Die Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

7.1 Mittlere Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten in den Tideflüssen

7.1.1 Bremerhaven

Die tideabhängigen Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeiten in der 200 m breiten Fahrrinne der Weser sowie den westlich und östlich angrenzenden 150 m breiten Querschnitten vor der Nord- und Kaiserschleuse sind in den Abb. 152 und 153 dargestellt.

Typisch ist die unsymmetrische Strömungsverteilung während der Flutstromdauer. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten werden überall in der zweiten Stunde nach der Ebbestromkenterung etwa bei $T\frac{1}{2}w$ erreicht.

Die stärksten Strömungen wurden in beiden Fällen im Fahrrinnenbereich berechnet. Bei vergleichbaren Tide- und Oberwasserbedingungen betrugen die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten $v_{fm} \geq 80 \text{ cm/s}$ und maximal wurden $v_{fmax} = 144 \text{ cm/s}$ erreicht. Am schwächsten waren die mittleren Flutströmungen östlich vom Fahrwasser in den Einflussbereichen der Austauschvorgänge mit den Vorhäfen (Profile 1 bis 3 in Abb. 152 und 153). Zusätzlich spielen dabei auch die morphologischen Gegebenheiten eine Rolle (vgl. Abb. 9). Von der südlichen Stromkaje aus verlagert sich der Talweg nach Westen. Unterhalb des Vorhafens zur Nordschleuse sind an der Stromkaje stärkere Strömungen zu verzeichnen als westlich vom Fahrwasser (Profil 5 in Abb. 152). Im Profil 1 der Abb. 153 ist es umgekehrt.

Die in Abb. 154 und 155 aufgetragenen Ebbestromgeschwindigkeiten weisen einen parabolischen Verlauf auf. Bei der Ebbestromphase werden in der Weser die stärksten Strömungen erst in der dritten Stunde nach der Flutstromkenterung erreicht.

Die Messungen vor der Nordschleuse wurden bei einer Nipptide mit einem Tidefall von lediglich 251 cm und einem $Q_o = 281 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt. Die absoluten Werte der gemittelten Geschwindigkeiten weichen im Bereich der Nordschleuse (Abb. 154) nur geringfügig voneinander ab. Insgesamt gesehen sind sie im Fahrwasser und westlich davon stärker als im östlichen Bereich. Die Austauschvorgänge im Vorhafenbereich und die geringen Sohliefen vor der Columbuskaje sind ursächlich für die geringen Strömungsintensitäten östlich des Fahrwassers (vgl. Abb. 9). Die Strömungen lehnen sich erst unterhalb Strom-km 70 mehr an die Stromkaje an.

Bei einem Tidefall von $Thb = 324 \text{ cm}$ waren die für den 12. Oktober 2005 ermittelten Ebbestromgeschwindigkeiten vor der Kaiserschleuse um 1 bis 2 dm stärker als am 18. April 2005 (Abb. 155 und Abb. 154). Morphologisch bedingt wurden in allen Profilen westlich vom Fahrwasser mit $v_{em} \approx 70$ bis 80 cm/s die stärksten Strömungen und östlich die kleinsten Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt (vgl. Abb. 9). Im tieferen Wasser außerhalb der Fahrrinne bleibt die relativ hohe Strömungsintensität von $v_{em} > 1 \text{ m/s}$ länger, bis rd. 1 Stunde vor Tnw erhalten (Abb. 155).

Die Zufahrt zur Doppelschleuse Bremerhaven liegt am Blexer Bogen (vgl. Abb. 3). Die aus den ADCP-Messungen berechneten mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten im Tidestrom sind in Abb. 156 dargestellt.

Wie vor der Nord- und Kaiserschleuse wurden die stärksten Flutstromgeschwindigkeiten vor der Geestemündung in der zweiten Stunde nach der Ebbestromkenterung etwa bei $T\frac{1}{2}w$ erreicht.

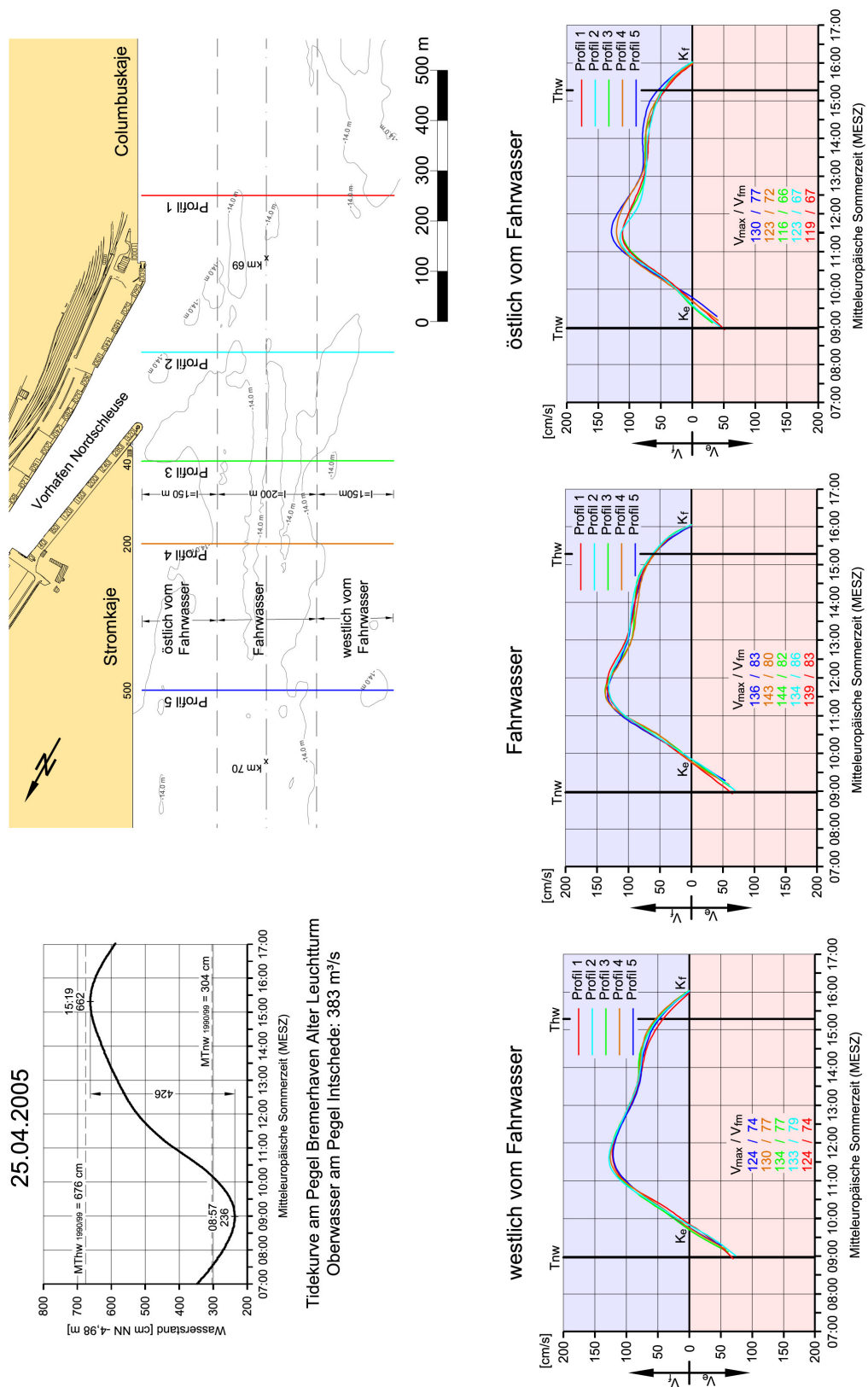


Abb. 152: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Nordschleuse am 25.04.2005

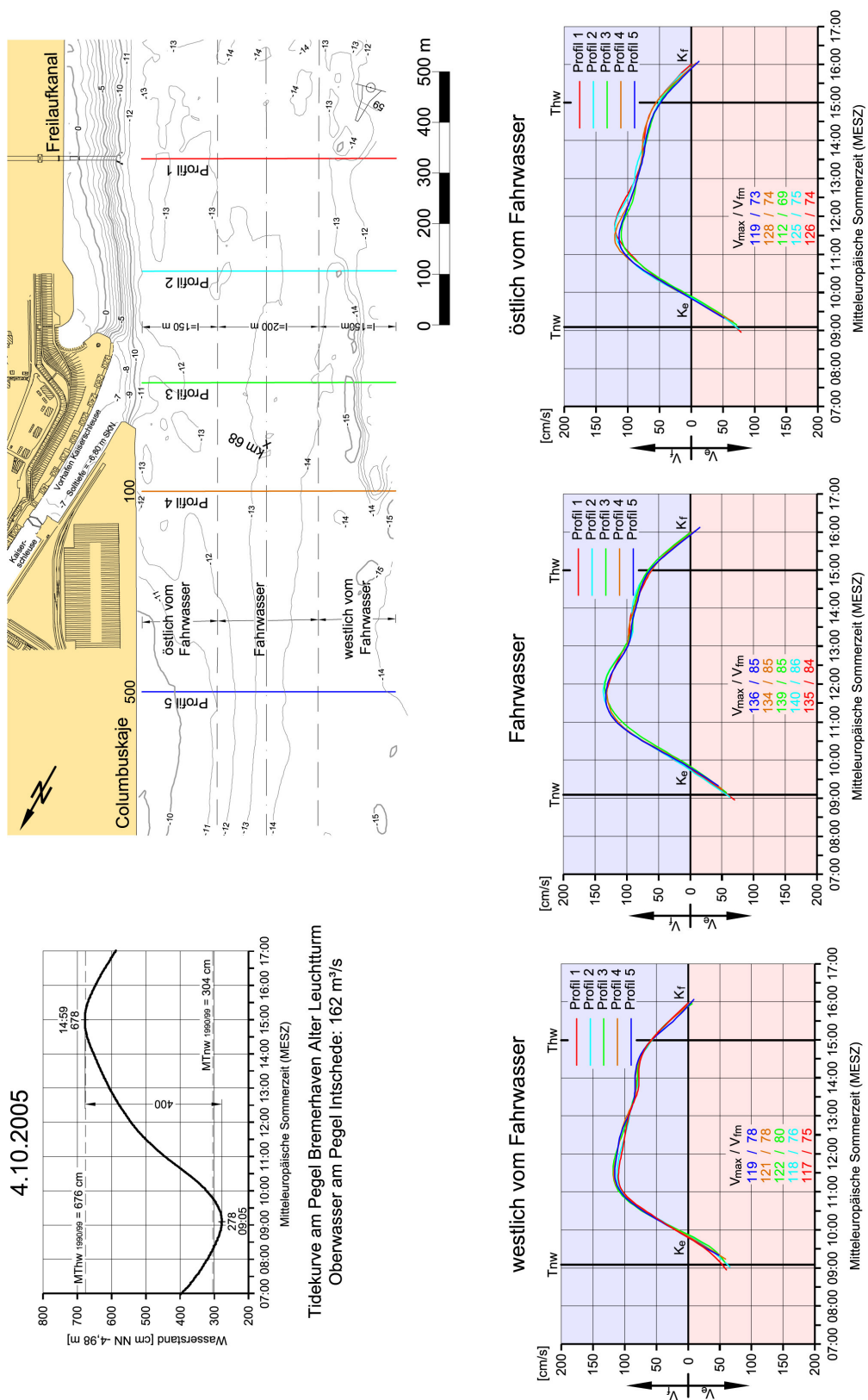


Abb. 153: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Kaiserschleuse am 04.10.2005

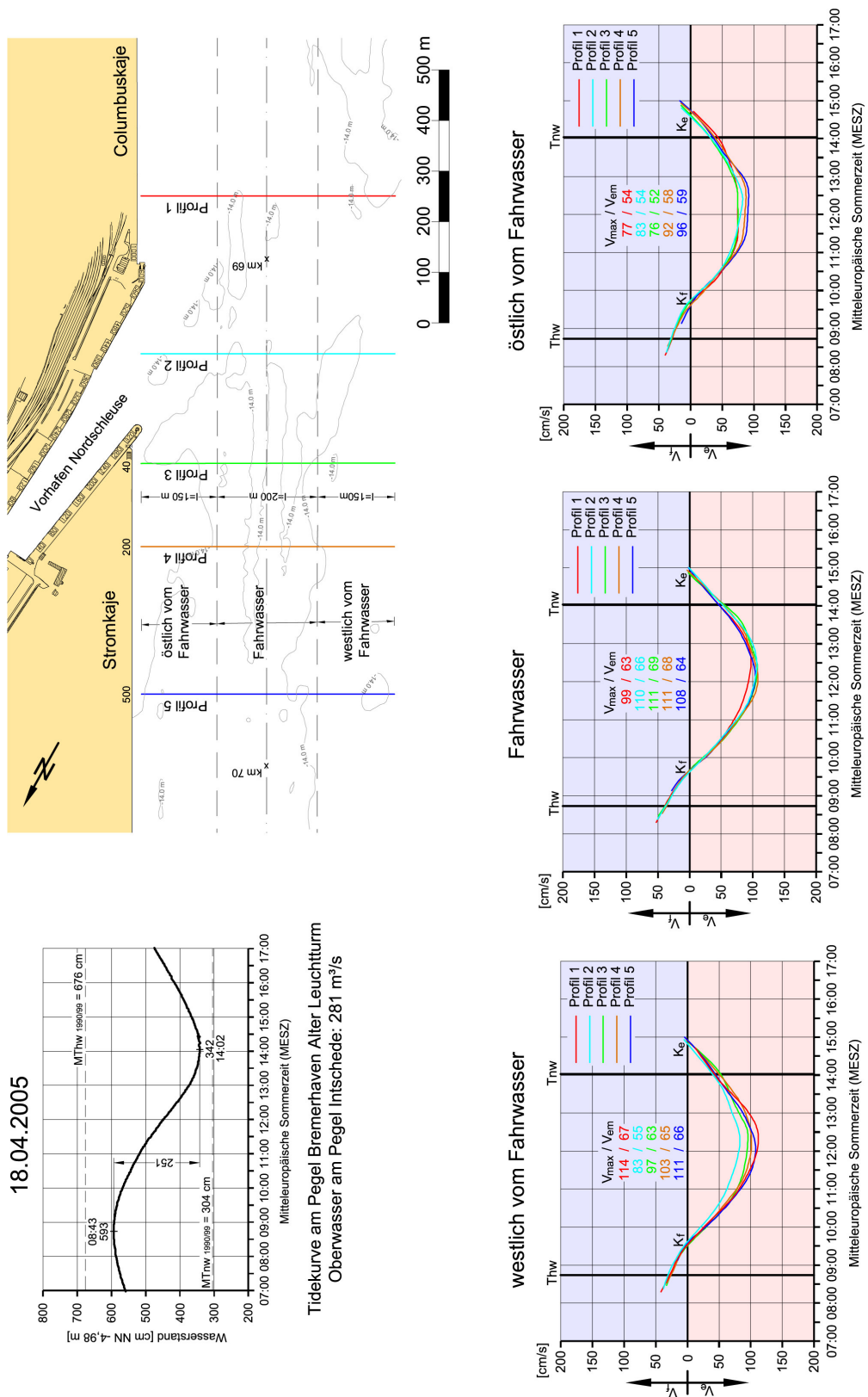


Abb. 154: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Nordschleuse am 18.04.2005

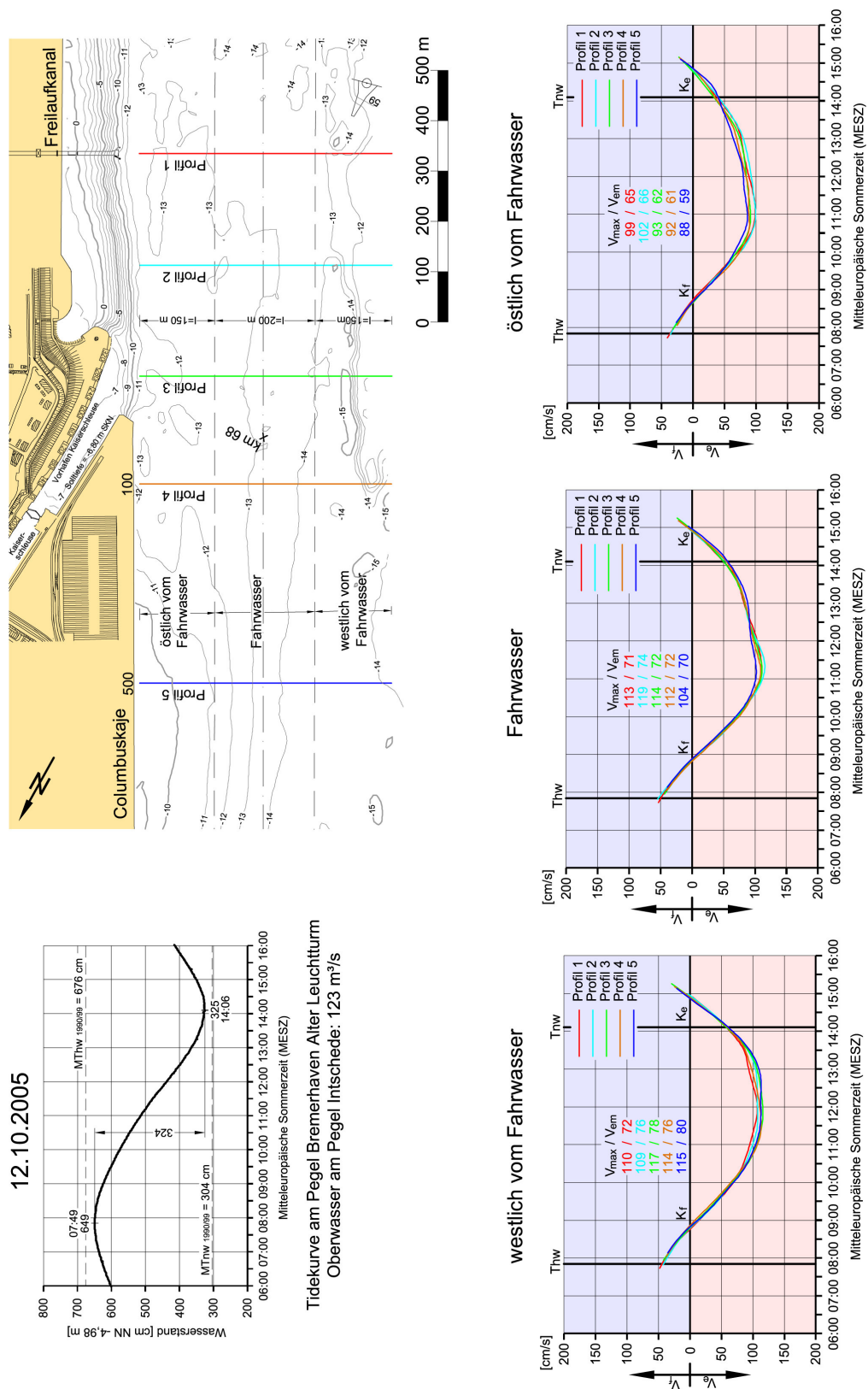
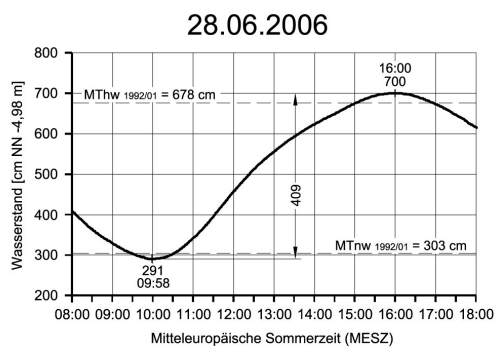
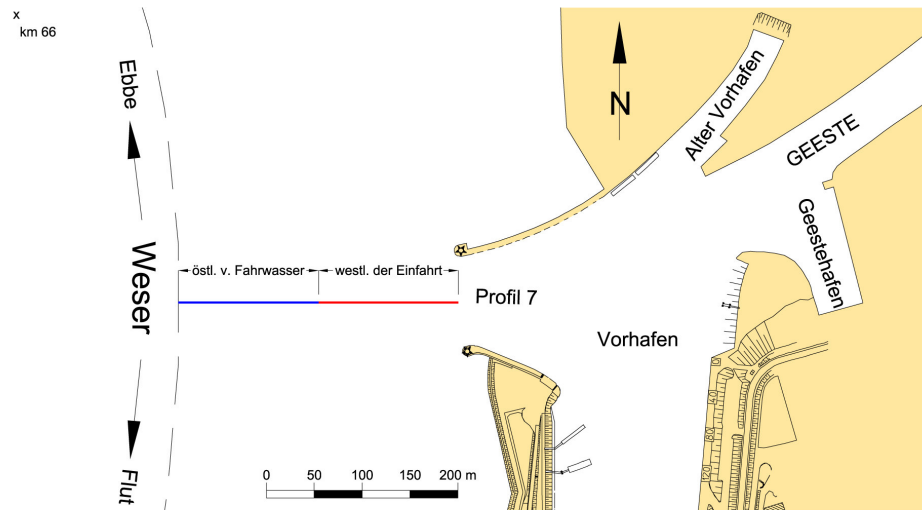
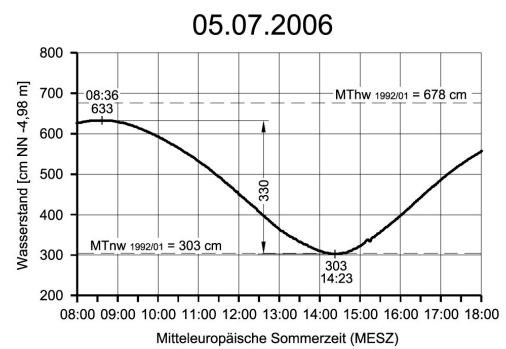


Abb. 155: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Kaiserschleuse am 12.10.2005



Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm
Oberwasser am Pegel Intschede: 199 m³/s



Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm
Oberwasser am Pegel Intschede: 160 m³/s

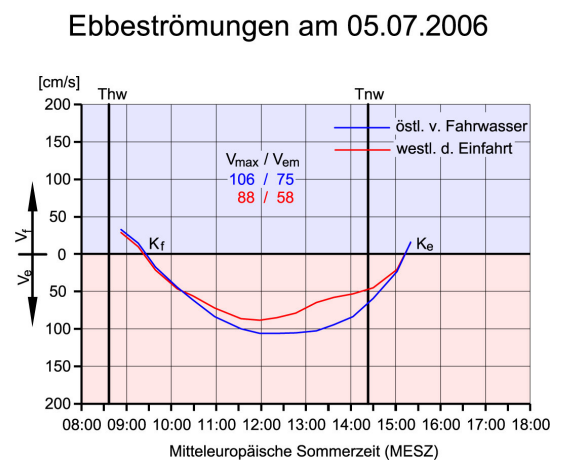
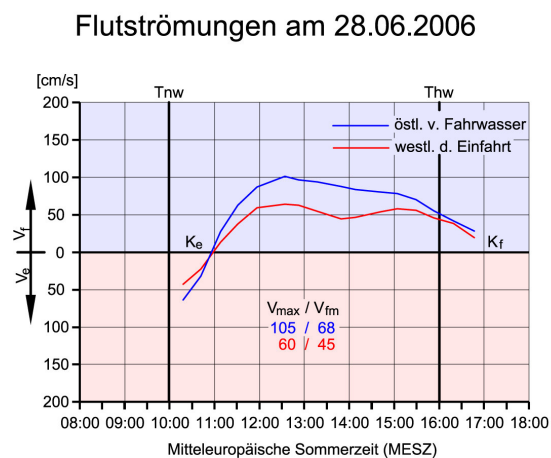


Abb. 156: Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in der Weser vor der Geestemündung

Die Köpfe der Geestemolen sind etwa doppelt so weit vom rechten Fahrwasserrand der Weser entfernt, wie die Vorhafeneinfahrten der nördlich gelegenen Schleusen zum Überseehafen. Die morphologischen Randbedingungen im Blexer Bogen (vgl. Abb. 3 und 9) sind ursächlich für die relativ geringen Strömungsintensitäten vor der Geestemündung.

Im Gegensatz zu den unterhalb gelegenen Hafenzufahrten dominieren vor der Geeste östlich vom Fahrwasser die Ebbeströmungen (Abb. 156). Das ist damit erklärt, dass die salzhaltigeren Flutwassermengen verstärkt im tiefen Wasser des Prallhangs weiter außerhalb stromauf gelangen. Das mit der Ebbe abfließende spezifisch leichtere Süßwasser verstärkt dagegen die Oberflächenströmung auch östlich der Fahrrinne im flacheren Wasser (vgl. Abb. 9). Die im Tiderhythmus auftretenden Strömungs-, Dichte- und Tideeffekte verursachen im Vorhafen zur Doppelschleuse eine positive Feststoffbilanz. Während der Flutstromphase werden Feinstanteile aus der Weser in den Vorhafen transportiert. Die Strömungs- und Dichteeffekte sind in der Ebbestromphase schwächer ausgeprägt. Der Vorhafen wird deshalb mit Feststoffen bis zur Sättigung aufgefüllt, so dass sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Insgesamt gesehen haben die Strömungen, Salz- und Schwebstoffgehalte im Vorhafen der Doppelschleuse grundsätzlich die gleichen Verhaltensmuster wie bei den im vorausgegangenen Projekt 03 KIS 019 untersuchten Vorhäfen an der Ems und Weser.

7.1.2 Emden

In der Brackwasserzone der Ems werden die Sohlströmungen wie in der Weser durch Dichteeffekte während der Flut verstärkt und in der Ebbestromphase geschwächt. Das während einer Tide anfallende Oberwasser wird mit den Ebbeströmungen verstärkt in den oberen Wasserschichten abgeführt.

Die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten treten in der Ems ebenfalls in der zweiten Stunde nach der Strömungsumkehr, am Ende des dort besonders ausgeprägten steilen Flutastes auf (Abb. 157). Anschließend nimmt die Strömungsintensität kontinuierlich bis zur Kenterung ab. Kennzeichnend ist auch die unsymmetrische Verteilung der Flutstromgeschwindigkeiten im Tideablauf.

Das zur Einfahrt ausgerichtete nordöstliche Profil 3 dokumentiert die Austauschvorgänge des Vor- und Außenhafens mit der Ems. Durch die Überlagerung der Strömungs-, Dichte- und Tideeffekte sind dort relativ geringe Strömungen während der Flutstromphase zu verzeichnen. Am stärksten sind die Flutströmungen nördlich des Fahrwassers im Profil 4 im Bereich der Einengung am oberen Ende des Emskais (Abb. 157). Von der Westmole aus strömen die Flutwassermengen zum Staupunkt am Kopf der Ostmole und fachen die linksdrehenden Flutstromwalzen an. Mit zunehmender Flutdauer verlagern sich die Walzenströmungen in die tieferen Wasserschichten (vgl. Abb. 68 und 69). Aufgrund der Dichteunterschiede strömt das während der vorausgegangenen Ebbestromphase eingetragene spezifisch leichtere Wasser an der Oberfläche aus dem Vor- und Außenhafen in die Ems zurück.

Oberhalb der Ostmole erhöht sich die Emssohle um rd. 3 m. Im Bereich der Schleusenzufahrten

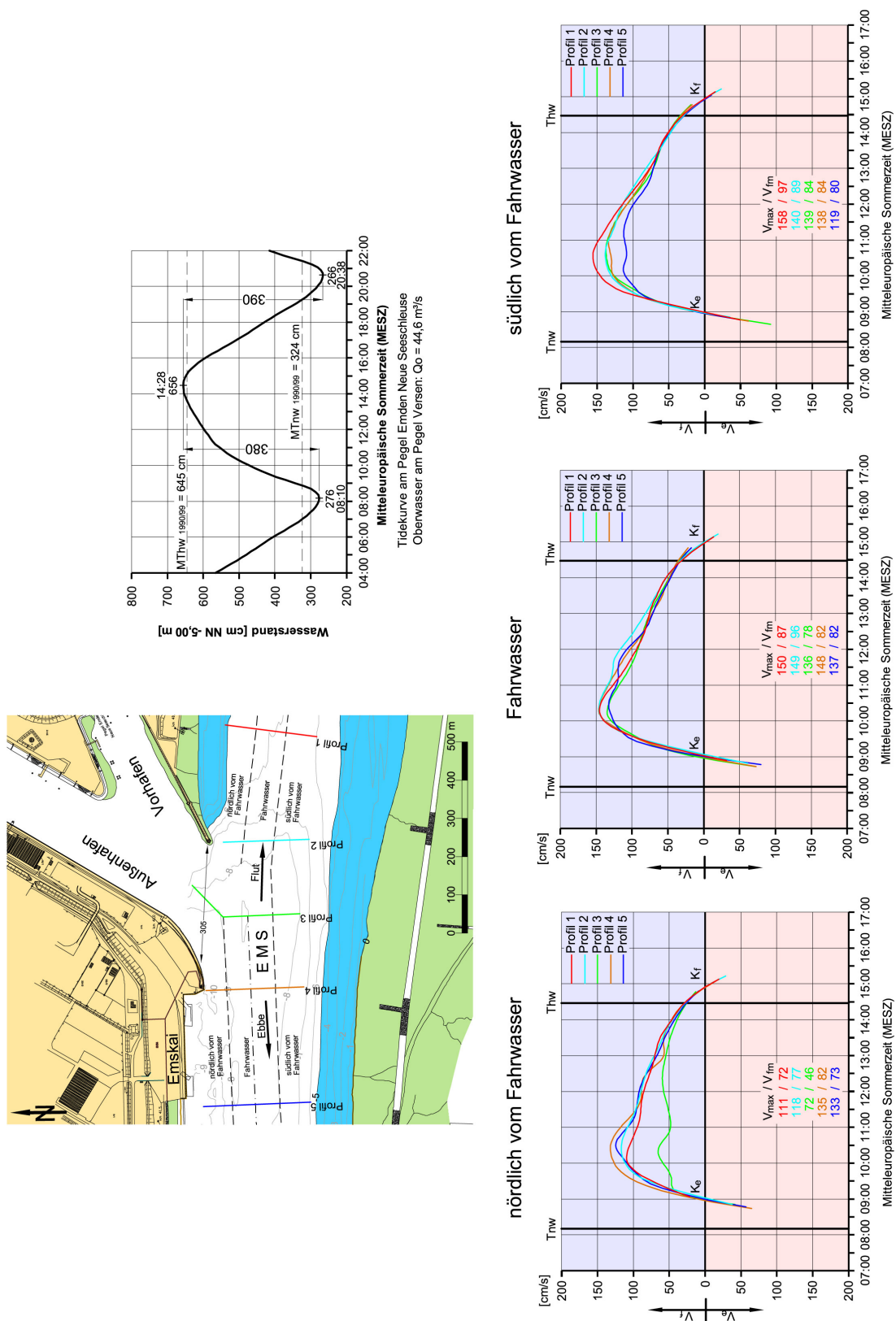


Abb. 157: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Ems bei Emden am 25.05.2005

kommt es zu einer Umlenkung der Strömungen nach Süden, was auf die in Abb. 67 dargestellten morphologischen Bedingungen im Tidestrom, die Linienführung der Ems und die Austauschvorgänge mit dem Vor- und Außenhafen zurückzuführen ist. Die größten Geschwindigkeiten wurden, kontinuieritätsbedingt südlich im verringerten Durchflussquerschnitt ermittelt (Profil 1 in Abb. 157).

Die gemittelten Ebbestromgeschwindigkeiten für die am 1. Juni 2005 in der Ems gemessenen 5 Profile sind in Abb. 158 dargestellt. Erwartungsgemäß sind die Ebbestromgeschwindigkeiten, dem Verlauf der Tidekurve entsprechend, gleichmäßiger verteilt, als die Flutströmungen. Auch während der Ebbephase sind die Austauschvorgänge im Einfahrtsbereich stark ausgeprägt. Sie wirken sich im Profil 3 bis in den Fahrwasserbereich aus.

Die stärksten Ebbeströmungen wurden ebenfalls im südlichen Bereich von Profil 1 bestimmt. Insgesamt ist aus den Auftragungen in Abb. 158 abzulesen, wie sich die maximalen Ebbeströmungen innerhalb der Querschnitte stromab zum rechten Emsufer verlagern (vgl. Abb. 75 und 77). Sie folgen wie in der Flutphase der Flussgeometrie und den bathymetrischen Gegebenheiten (vgl. Abb. 67).

Es bleibt festzustellen, dass die tideabhängigen Strömungs-, Salzgehalts- und Schwebstoffverhältnisse im Brackwasserbereich der Ems mit denen in der Weser bei Bremerhaven ähnlich und miteinander vergleichbar sind.

7.1.3 Brunsbüttel

Die mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten sind aus den ADCP-Messungen für die 400 m breite Fahrrinne und den nördlich und südlich angrenzenden 500 m breiten Querschnitten berechnet worden. Die gemittelten Flutstromgeschwindigkeiten vom 6. Juli 2005 sind in Abb. 159 aufgetragen. Die zugehörigen morphologischen Randbedingungen gehen aus Abb. 92 hervor. Die drei Profile liegen oberhalb einer Linkskrümung der Elbe. Dem Talweg entsprechend treten im Fahrwasser die stärksten Flutstromgeschwindigkeiten auf. Auch südlich der Fahrrinne sind die Strömungsgeschwindigkeiten noch merklich stärker als auf der nördlichen Seite (Abb. 159 und Abb. 93 und 94). Dichtebedingt gelangen die von der See kommenden salzhaltigeren Flutwassermengen auch in der Elbe mehr im tiefen Wasser stromauf. Aus Abb. 159 geht ebenfalls hervor, dass sich die Flutstromkenterung gegenüber dem Thw deutlich mehr verspätet als die Ebbestromkenterung gegenüber dem Tnw. Außerdem sind die Flutstromgeschwindigkeiten in der Elbe bei Brunsbüttel gleichmäßiger verteilt sind als in der Ems und Weser in Emden und Bremerhaven.

Die im März 2007 nach dem Durchgang der Hochwasserwelle in Neu Darchau durchgeführten Messungen zeigen ein ähnliches Bild bezüglich der Kenterzeiten und mittleren Geschwindigkeiten (Abb. 160). Aufgrund der höheren Tide mit den größeren Flutwassermengen waren die Strömungsgeschwindigkeiten etwas stärker als Anfang Juli 2005. Die intensiveren Strömungen wurden wieder im Fahrwasser und südlich davon ermittelt (Abb. 160 sowie Abb. 99 und 100). Die geringeren Tiefen in den nördlichen Bereichen der Profile und die Schleusenzufahrten sind

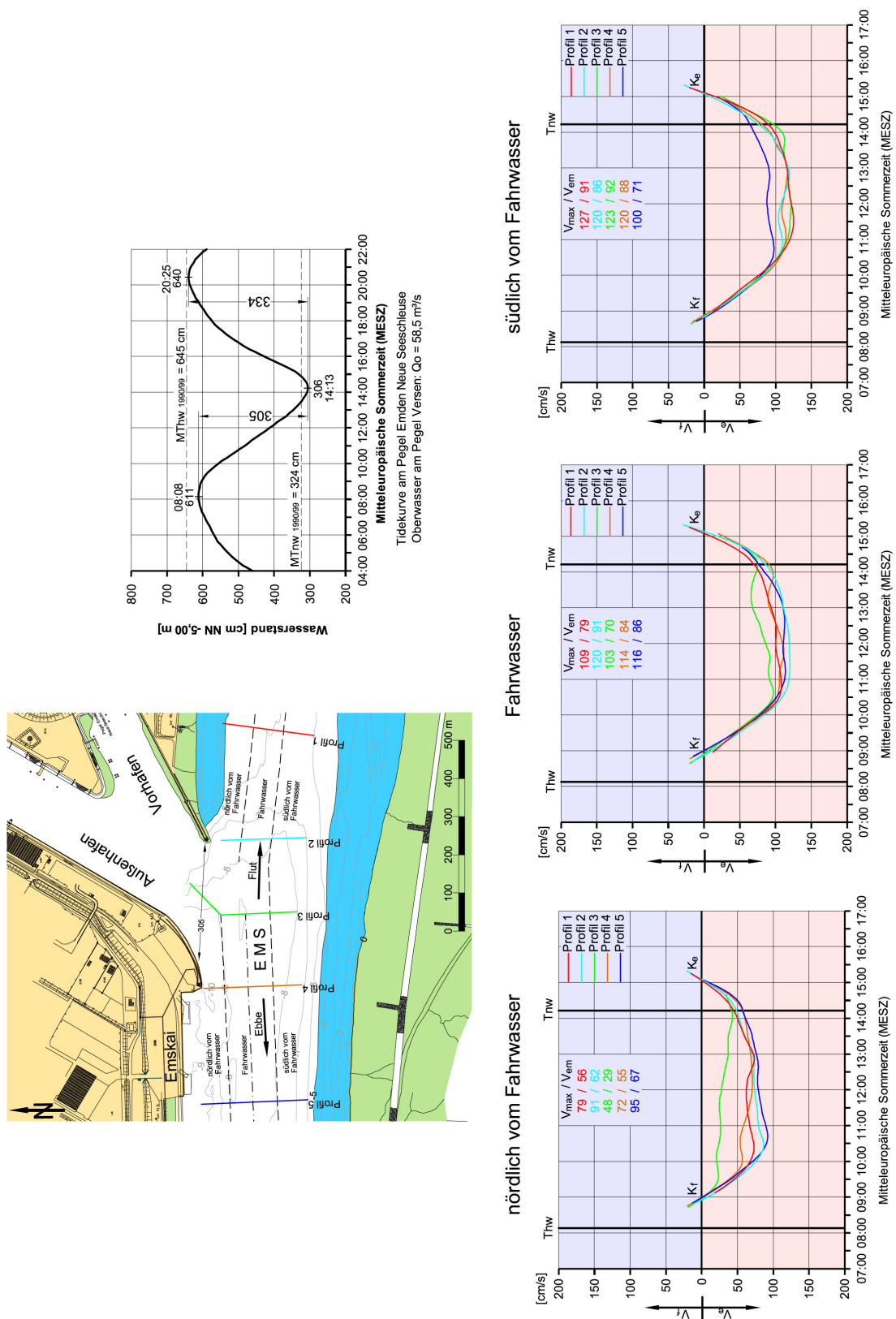


Abb. 158: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Ems bei Emden am 01.06.2005

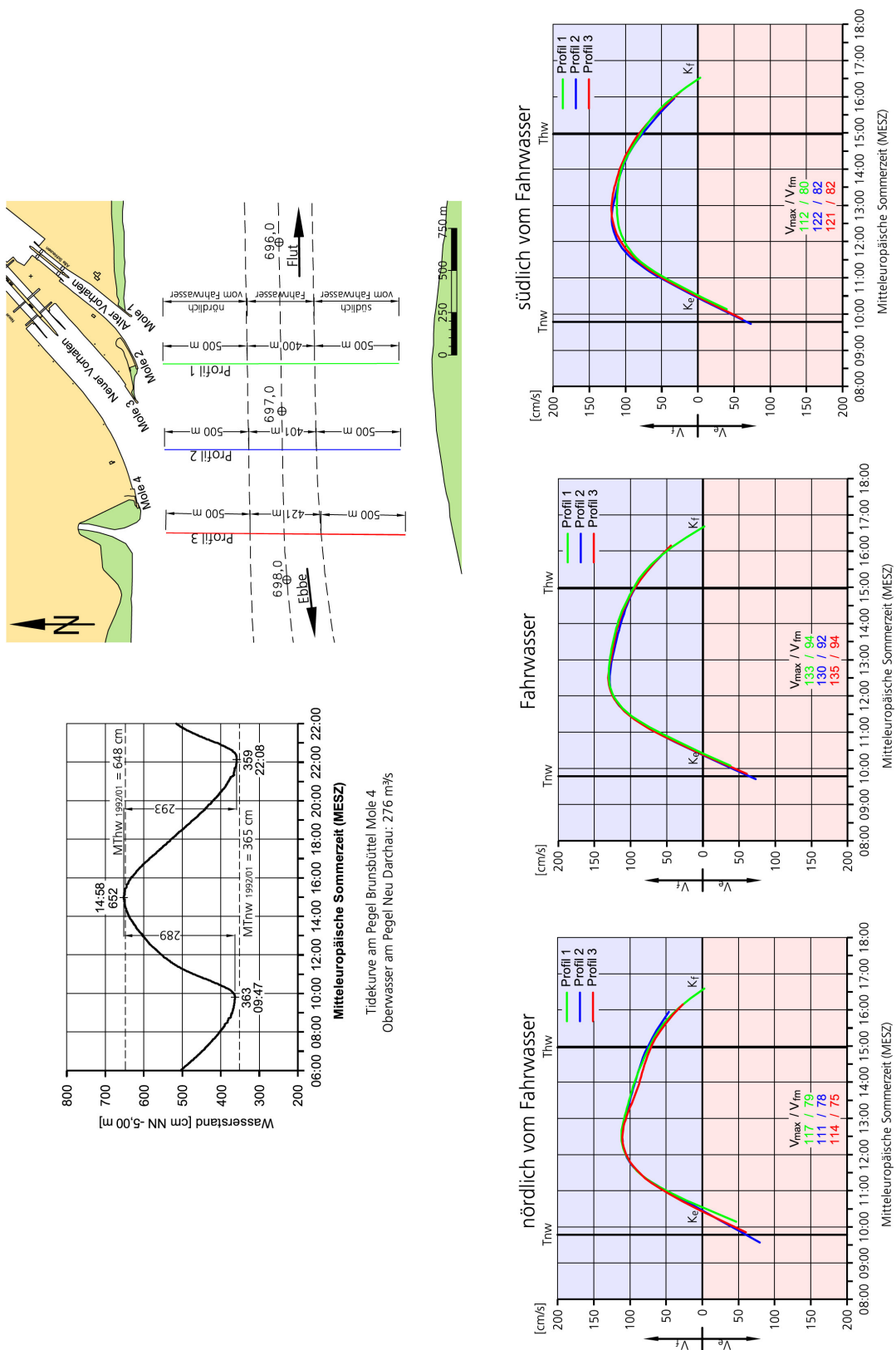


Abb. 159: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee-Kanal am 06.07.2005

ursächlich für die kleineren Wassermengen und Fließgeschwindigkeiten (vgl. Abb. 92).

Vor allem im Fahrwasser fällt bei der Flutmessung vom März 2007 die symmetrische Strömungsverteilung mit dem späteren Eintritt der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten auf. Dieser Umstand kann auch auf das höhere Oberwasser im März 2007 zurückgeführt werden.

Wie in den Revieren an der Ems und Weser sind die Ebbestromgeschwindigkeiten auch in der Elbe im Tideablauf gleichmäßiger als die Flutströmungen verteilt (Abb. 161). Die Ebbestromverteilungen im Querschnitt folgen dem natürlichen Verlauf der Elbe. Die Ebbwassermengen fließen verstärkt außerhalb des Fahrwassers im nördlichen Elbequerschnitt stromab (vgl. Abb. 107 und 111). Die maximalen Fließgeschwindigkeiten sind dabei dichtebedingt in den oberen Wasserschichten anzutreffen. Mit Abb. 161 wird veranschaulicht, wie die Strömungsintensitäten in den Querschnitten von Nord nach Süd geringer werden. Nördlich des Fahrwassers waren die Ebbestromgeschwindigkeiten im Juni 2005 (Abb. 161) trotz des geringeren Tidefalls von $Thb = 256$ cm stärker als bei der Flutmessung im Juli 2005 bei vergleichbarem Oberwasser und einem Tidehub von $Thb = 289$ cm (Abb. 159). Es bestätigt sich, dass das spezifisch leichtere Oberwasser während der Ebbestromphase die Oberflächenströmungen verstärkt. Bemerkenswert ist der starke Geschwindigkeitsabfall bei den Ebbeströmungen von Nord nach Süd in Abb. 161.

Die Nipptide vom 13. März 2007 ($Thb = 223$ cm) mit den damit verbundenen Tidewassermengen ist offenbar ursächlich für die insgesamt geringen Strömungsgeschwindigkeiten in Abb. 162 trotz des höheren Oberwassers gegenüber der Messung vom Juni 2005 (Abb. 161). Im Fahrwasser und nördlich davon wurden jedoch stärkere Ebbeströmungen ermittelt als in den südlichen Abschnitten.

Die vorstehenden Ausführungen haben gezeigt, dass die hydraulischen Gegebenheiten zwar vom Oberwasser aber auch ganz bedeutend vom Tidegeschehen und den morphologischen Randbedingungen beeinflusst wird.

Ergänzend zu dem vorausgegangenen vom BMBF geförderten KFKI-Projekt 03 KIS 019 waren in diesem Vorhaben 03 KIS 051 Messungen in der Natur vom Institut für Wasserbau (IWA) der Hochschule Bremen im Neuen und Alten Vorhafen des Nord-Ostsee-Kanals und der angrenzenden Elbe durchzuführen. Es war damit die Frage zu klären, ob die in den Brackwasserhäfen an der Ems und Weser ermittelten hydrodynamischen und morphologischen Randbedingungen auch im oberen Brackwasserbereich der Unterelbe anzutreffen sind. Zusammenfassend bleibt dazu festzustellen, dass in den Brackwasserregionen der deutschen Tideflüsse vergleichbare und allgemein gültige Verhältnisse herrschen. Die Überlagerung von Strömungs- und Dichteeffekten führt überall zu positiven Feststoffbilanzen in den Vorhäfen. Die besonderen Zusammensetzungen der Schwebstofffrachten im Mischbereich von Süß- und Salzwasser führt in den Vorhäfen zur Bildung von Flussschlamm.

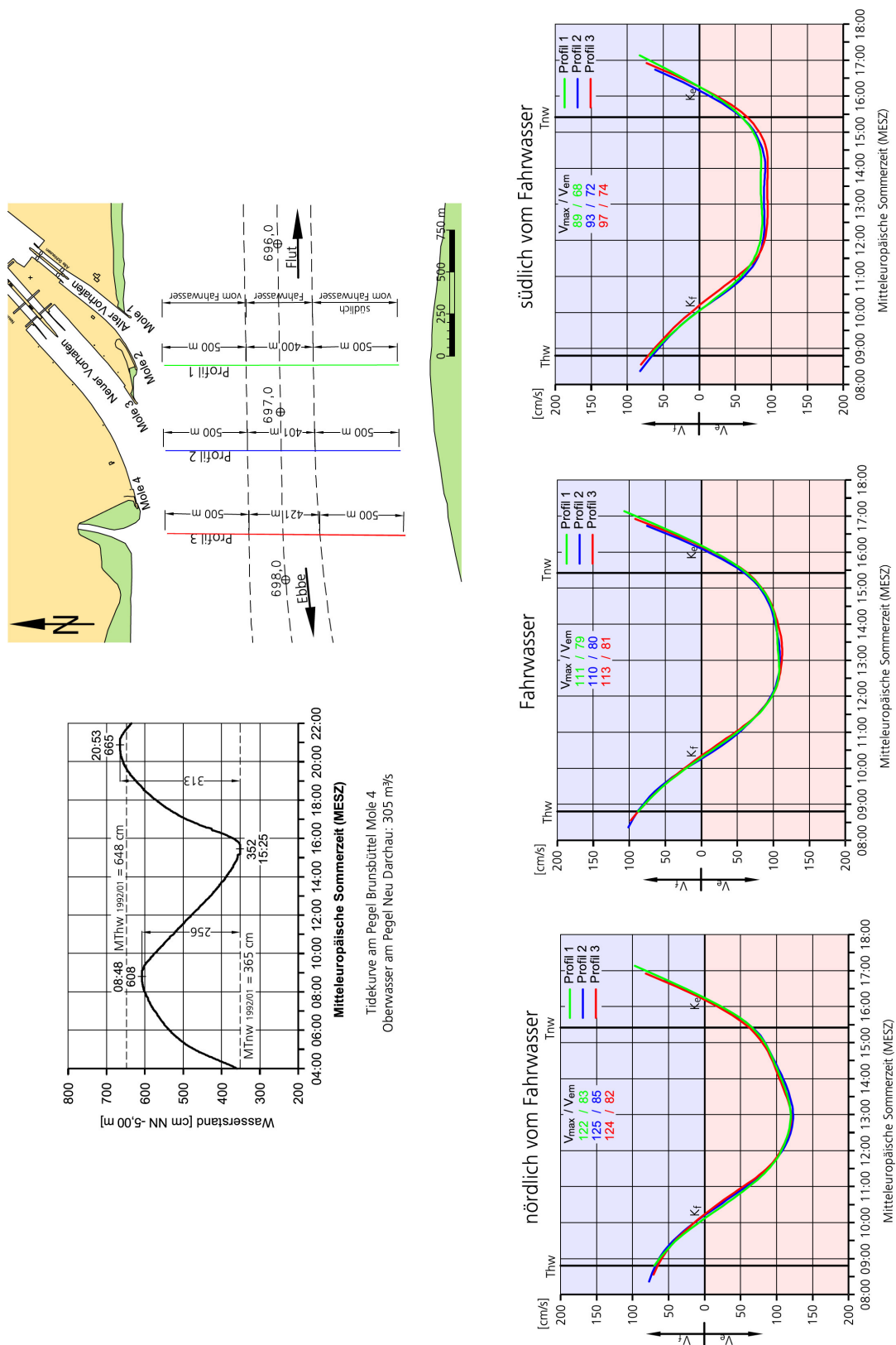


Abb. 161: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee-Kanal am 29.06.2005

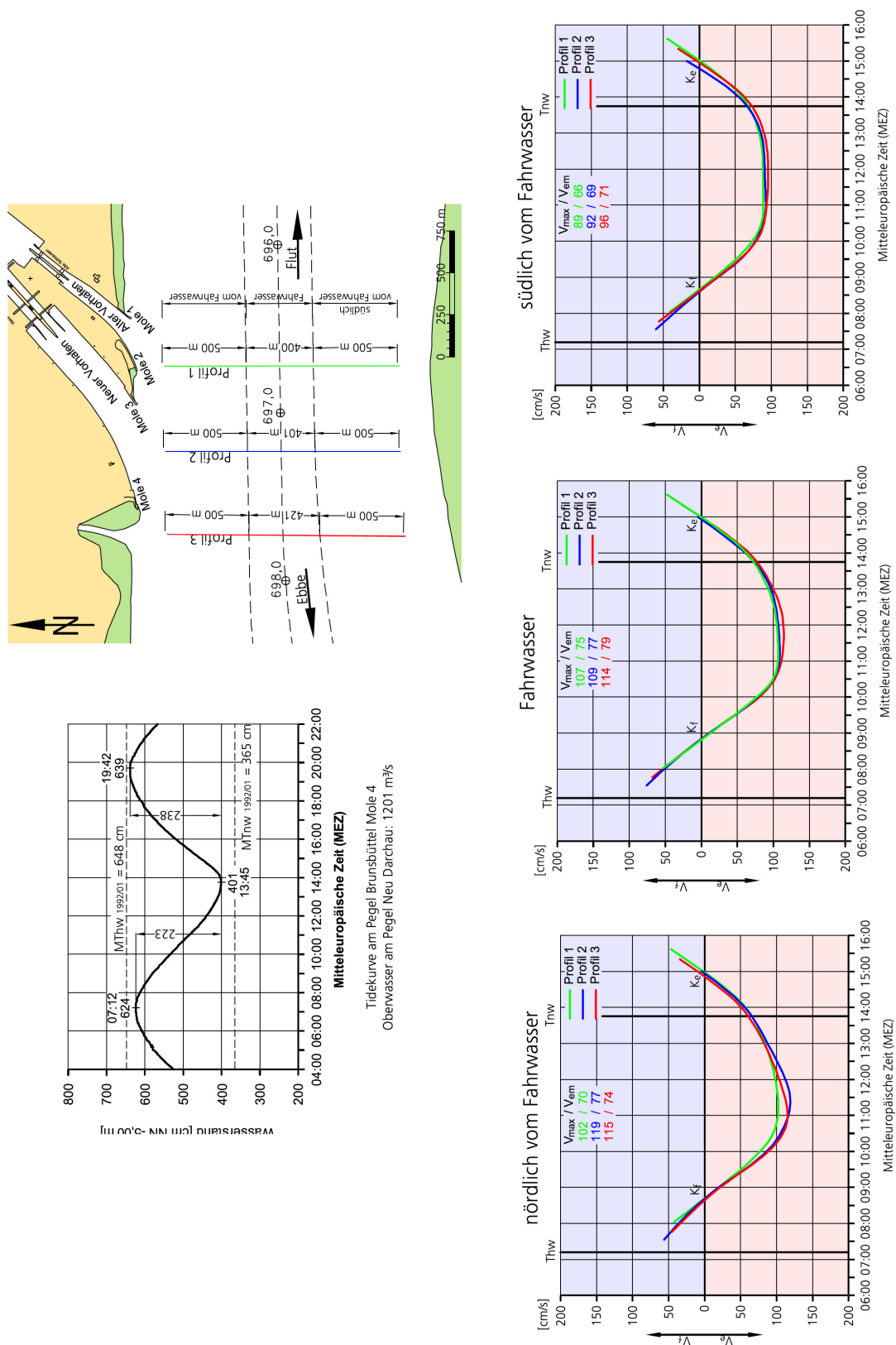


Abb. 162: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee-Kanal am 13.03.2007

7.2 Oberwasser und Salzgehalte

Die oberwasserabhängigen Salzgehalte in den verschiedenen Revieren wurden mit den Projekten 03KIS019 und 03KIS051 bearbeitet. Die Ergebnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

7.2.1 Bremerhaven

Für mittlere Abflussverhältnisse liegt die Weser bei Bremerhaven im mesohlinen Brackwasserbereich des Weserästuars. Mit $S = 5$ bis 18 ‰ . In Abb. 163 sind Salzgehaltsmessungen im Bereich der Nordschleuse für unterschiedliche Oberwasserverhältnisse gegenübergestellt.

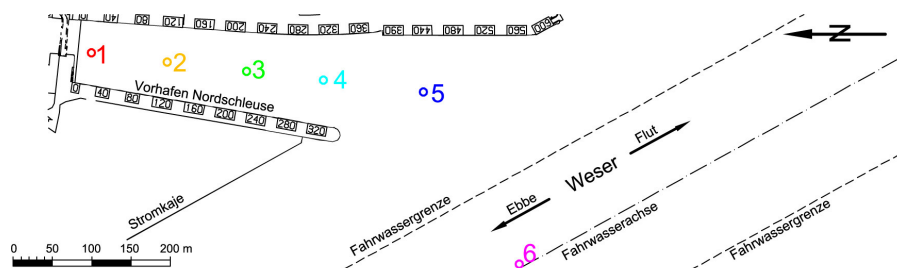
Es ist grundsätzlich so, dass die Konzentrationen im Vorhafen zu denen im Strom phasenverschoben sind. Mit ausklingender Ebbeströmung zum Zeitpunkt des Tnw ist im Weserwasser weniger Salz anzutreffen als vor der Schleuse. Bei Tidehochwasser ist es umgekehrt. Die relativ hohen Salzgehalte in der unteren Wasserschicht im Vorhafen der Nordschleuse bei den niedrigen Tidewasserständen sind besonders auffällig (Messung A in Abb. 163). Mit den ebbeorientierten Dichteströmungen wird das vorher eingetragene salzhaltigere Wasser zeitverzögert in den unteren Wasserschichten aus dem Vorhafen heraustransportiert.

In der zweiten Stunde nach Tnw kehrt sich das Dichtegefälle um. Das ist die Tidephase, in der im Vorhafen nur geringe Wasserbewegungen zu beobachten sind.

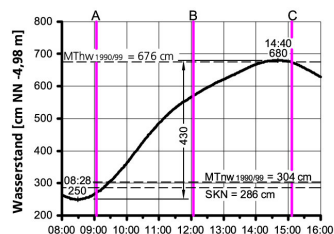
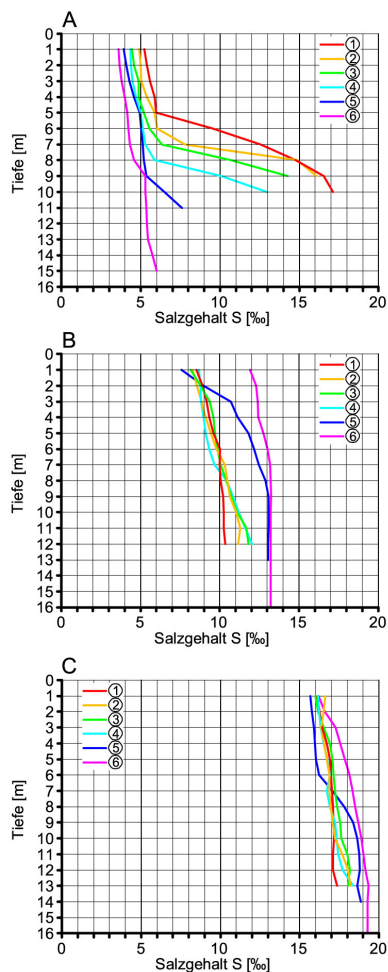
Etwa bei $T\frac{1}{2}w$, wenn sich die flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen ausbilden, herrscht ein starkes, horizontales Salzgehaltsgefälle von Position 6 (Weser) zur Position 1 (Binnenhaupt), so wie es in Abb. 163 (Messung B) dokumentiert wird. Besonders kennzeichnend ist in diesem Zusammenhang das Vertikalprofil der Position 5 in der Hafeneinfahrt (blaue Linien in Abb. 163) mit den deutlich auszumachenden Unterschieden des Salzgehaltes in den oberen und unteren Wasserschichten. Das erklärt die sich nach Tidehalbwasser ausbildenden und stabilisierenden Dichteströmungen. Mit fortschreitender Flutstromphase erhöht sich der Salzgehalt bis zum Eintritt des Thw kontinuierlich. Das horizontale und vertikale Gefälle bleibt dabei erhalten. Wie nach dem Tnw gleichen sich die Salzgehalte zwischen Schleuse und Weser zum Eintritt des Tidehochwassers an (Abb. 163, Messung C).

Vorstehend wurde dargelegt, wie die veränderlichen Salzgehalte in der Tideweser zu den flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen im Vorhafen der Nordschleuse führen. Die gleichen Randbedingungen gelten für sehr unterschiedliche Oberwasserverhältnisse. Das zeigt die Gegenüberstellung in Abb. 163 für etwa gleiche Tidebedingungen und Binnenabflüssen von $Q_0 = 212 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $571 \text{ m}^3/\text{s}$. Die absolut geringeren Salzgehalte in der Weser im März 2002 sind dabei von untergeordneter Bedeutung. Wesentlich für die Erzeugung der Dichteströmungen sind die Salzgehaltsdifferenzen zwischen Tidestrom und angrenzendem Vorhafen (Abb. 163, Messung B).

Am 17. Mai 2001 betrug der Nipptidefall 286 cm und das Oberwasser $Q_0 = 250 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei der Nipptide vom 5. April 2002 ($\text{Thb} = 339 \text{ cm}$) war der Abfluss am Pegel Intschede $Q_0 = 400 \text{ m}^3/\text{s}$. In der letzte Flutstromphase bis etwa eine Stunde nach Thw ist die in Abb. 164 eingetragene

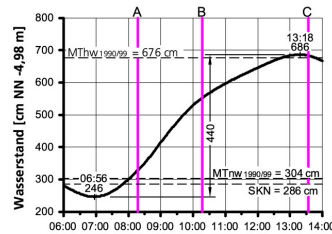
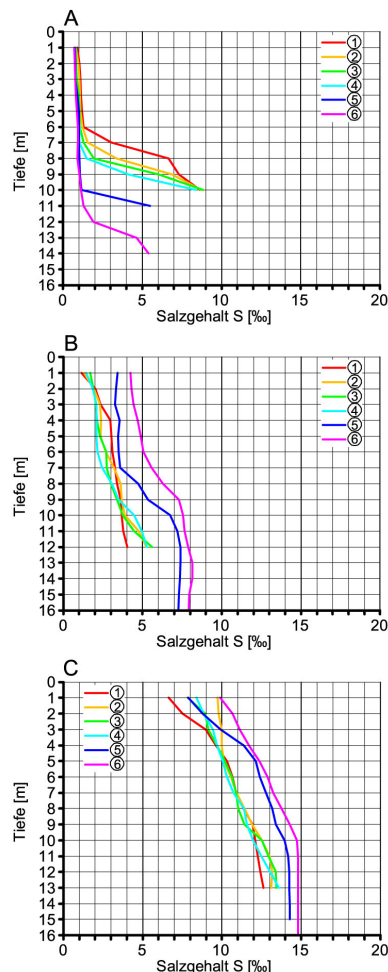


23.05.2001 ($Q_0 = 212 \text{ m}^3/\text{s}$)



Mittteleuropäische Sommerzeit (MESZ)
Tidekurve aufgenommen am 23.05.2001
am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm
Oberwasser am Pegel Intschede: $212 \text{ m}^3/\text{s}$

28.03.2002 ($Q_0 = 571 \text{ m}^3/\text{s}$)



Mittteleuropäische Sommerzeit (MESZ)
Tidekurve aufgenommen am 28.03.2002
am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm
Oberwasser am Pegel Intschede: $571 \text{ m}^3/\text{s}$

Abb. 163: Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen

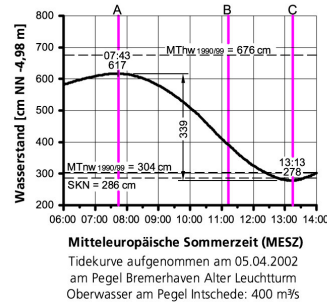
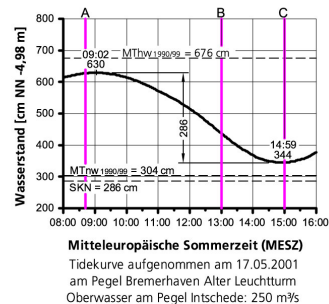
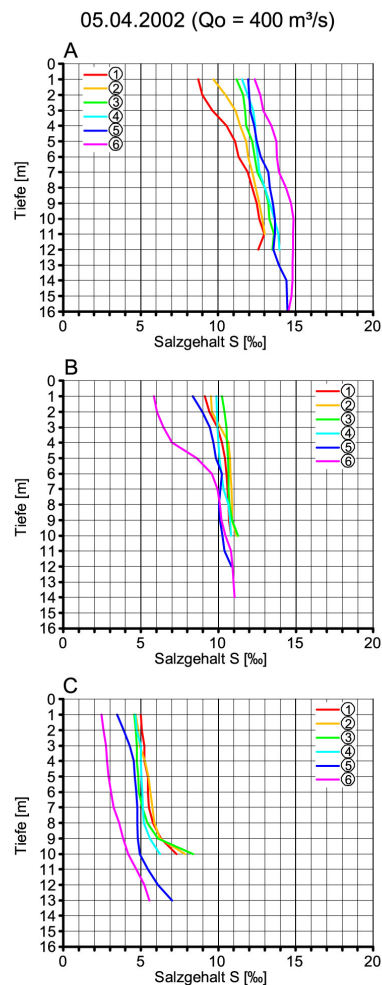
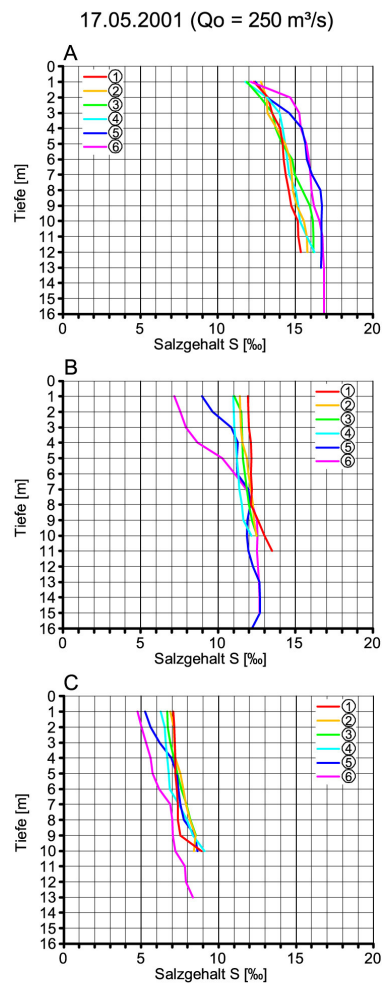
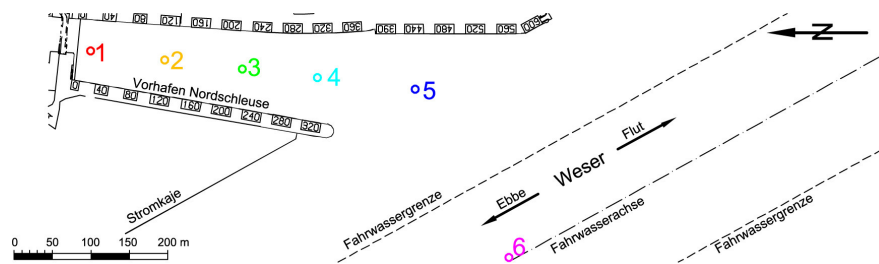


Abb. 164: Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen

Salzgehaltsverteilung (Messung A) mit den bei Springtide gemessenen Verhältnissen (Abb. 163, Messung C) vergleichbar.

Nach der Flutstromkenterung verringern sich die Salzgehalte im Tidestrom und Vorhafen bei Umkehrung des horizontalen Gefälles. Mit sich voll ausprägendem Ebbestrom wird zunehmend spezifisch leichteres Oberwasser in den höheren Wasserschichten stromab transportiert, was dort zu der verstärkten Abnahme der Salzkonzentration führt (Abb. 164, Messung B). Ab etwa Tidehalbwasser werden im Vorhafen die ebbestromorientierten Strömungseffekte angeregt. Die oben über die Walzenströmungen in den Vorhafen eindringenden Ebbewassermengen werden am Binnenhaupt der Schleuse gekehrt und verursachen das sohlennahe Ausströmen des spezifisch schwereren Wassers.

Zum Eintritt des Tnw ist das Wasser im Vorhafen salzhaltiger als im Strom (Messung C in Abb. 164). Die zu dieser Tidezeit noch vorhandenen Gradienten erklären die bis zur Ebbestromkenterung in der Weser anhaltenden Dichteströmungen im Vorhafen. Genau umgekehrt sind die Bedingungen zum Zeitpunkt des Tidehochwassers mit den höheren Salzgehalten im Strom.

Der in Abb. 164 dargestellte Vergleich für unterschiedliche Tide- und Oberwasserbedingungen zeigt auch für die Ebbephase das gleiche Verhaltensmuster der horizontalen und vertikalen Salzgehaltsverteilungen. Neben der typischen Schichtung während der Ebbestromphase (Messung B) sind die Salzkonzentrationen auch bei dem stärkeren Oberwasser in der Weser bei Tidehochwasser höher und bei Tideniedrigwasser geringer als im Vorhafen der Nordschleuse. Bei den Salzgehaltsmessungen vor der Kaiserschleuse vom 23. Oktober 2001 und 27. März 2002 betrug der Tidehub 335 cm bzw. 418 cm bei einem zugehörigem Oberwasser von $Q_o = 182 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $607 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 165). Übereinstimmend mit den Untersuchungen vor der Nordschleuse sind auch im Vorhafen der Kaiserschleuse bei Tideniedrigwasser relativ starken Gradienten der Salzgehalte zu beobachten (Messung A in Abb. 165 oben links).

Mit voll einsetzendem Flutstrom kehrt sich das Gefälle der Salinität vom Tidefluss zum Vorhafen um. Etwa ab $T\frac{1}{2}w$ kommt es bei starkem Vertikalgradienten in der Weser zu den flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen im Vorhafen, die bis nach dem Eintritt des Thw andauern.

Der Dichteunterschied bei den Messpunkten im Vorhafen von bis zu $\Delta S \approx 4 \text{ ‰}$ ist darauf zurückzuführen, dass das spezifisch schwerere Wasser unten in den Vorhafen strömt und das weniger salzhaltige Wasser aus den oberen Tiefenzellen heraustransportiert wird. Bezeichnend ist der mit zunehmender Flutdauer schwächer werdende Vertikalgradient in der Weser im Gegensatz zu den Profilen im Vorhafen vor allem in der Einfahrt (blaue Linie in Abb. 165). Wie bei der Nordschleuse werden phasenverschoben die Konzentrationen im Tidestrom erreicht.

Mit Abbildung 165 wird aufgezeigt, dass die für die Dichteströmungen erforderlichen Salzgehaltsdifferenzen zwischen der Weser und dem Vorhafen auch noch bei einem Oberwasser von $Q_o = 607 \text{ m}^3/\text{s}$ vorhanden sind. Das geht aus den etwa zu gleichen Flutphasen durchgeführten Messungen B und C hervor. Die ersten Messungen (A) dokumentieren die tideabhängigen Gradienten zur Ebbestromkenterung und bei der Umkehr der Dichteströmungen im Vorhafen.

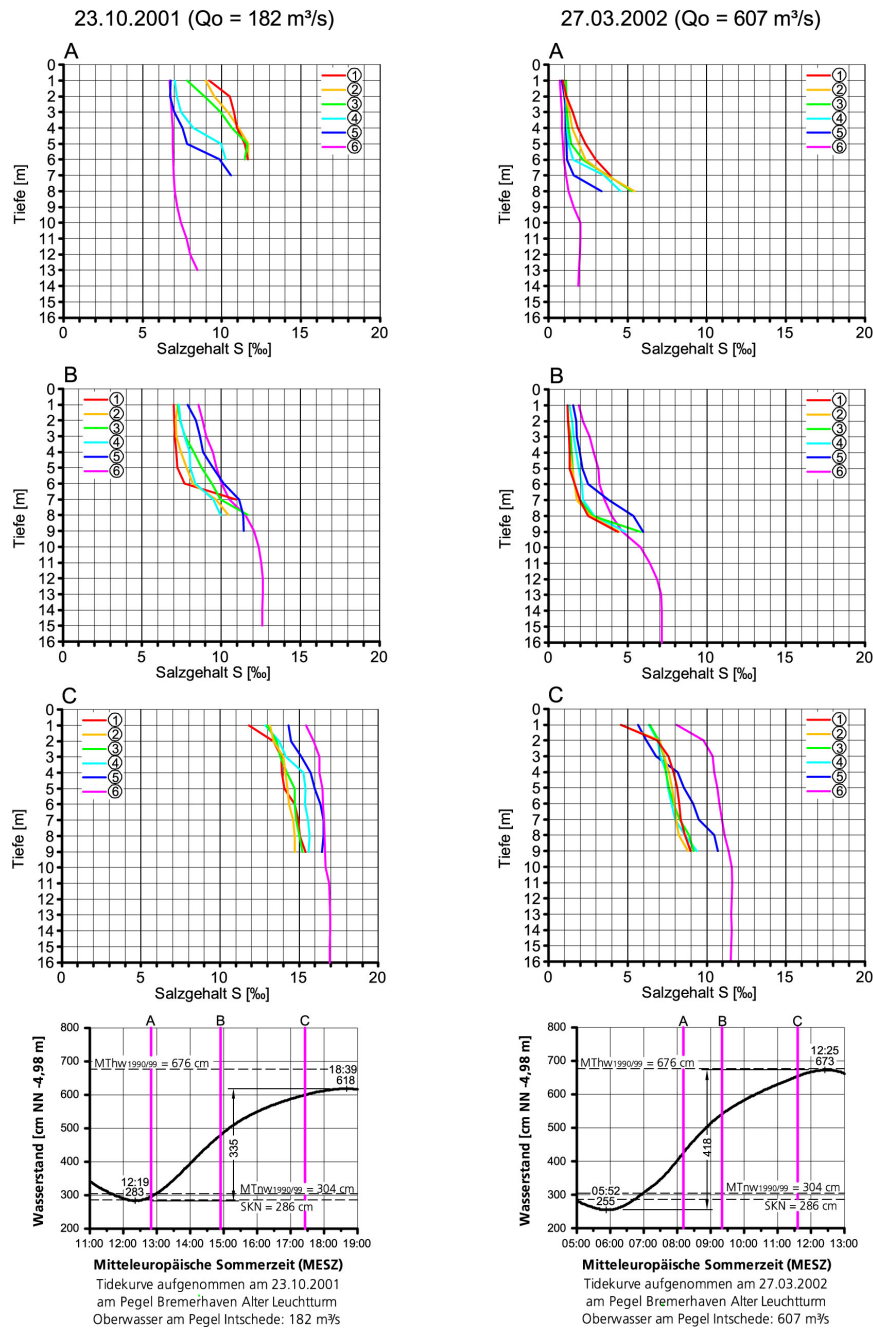
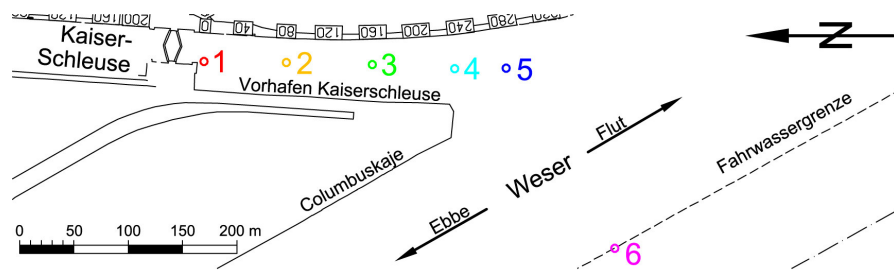


Abb. 165: Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen

Die Salzgehaltsverhältnisse bei den Nipptiden vom 26. Oktober 2001 und 04. April 2002 sowie Abflüssen von $Q_0 = 193 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $Q_0 = 419 \text{ m}^3/\text{s}$ sind in (Abb. 166) dargestellt. Nach Thw besteht nur noch ein geringes Gefälle zwischen Weser und Vorhafen (Messung A, Abb. 166). Die Differenzen von bis zu $\Delta S \approx 4 \text{ ‰}$ in den Vertikalen geben einen Hinweis auf die zu dieser Tidephase noch vorhandenen flutorientierten Dichteströmungen.

Die Profile in der Weser ab der dritten Stunde nach Thw (Abb. 166, Messung B) erklären die verstärkten Oberflächenströmungen während der Ebbestromphase. Die Salzgehaltsunterschiede erreichen im Tidestrom (Pos. 6) Werte bis zu $\Delta S \approx 6 \text{ ‰}$. Bezeichnend ist die deutliche Trennung zwischen den Wasserschichten unterschiedlichen Salzgehaltes.

Mit der Zunahme des horizontalen Salzgefälles vom Strom zum Vorhafen entwickeln sich die rechtsdrehenden Walzen- und durch das damit in den oberen Tiefenzellen einströmende „leichtere“ Wasser die zur Ebbestromphase zugehörigen Dichteströmungen. Die für Tnw in Abb. 166 aufgetragenen Salzgehaltsprofile und -gefälle erklären, weshalb der Dichteeffekt bis nach dem Eintritt des Tnw aufrecht erhalten wird.

Mit Abb. 166 wird die Abnahme der Salzgehalte während der Ebbestromphase bei unterschiedlichen Tide- und Oberwasserbedingungen aufgezeigt. Trotz der absolut im April 2002 um rd. 5 ‰ niedrigeren Salzgehalte sind die Horizontal- und Vertikalgradienten der Salzgehalte im Tideablauf in sich vergleichbar. Im übrigen wurde an anderer Stelle nachgewiesen, dass Dichteströmungen bereits bei geringen Salzgehaltsdifferenzen hervorgerufen werden (DE BROE, 2003). Die Stärke der Konzentrationen ist dabei von geringerer Bedeutung.

Im Vorhafen zur Doppelschleuse in Bremerhaven wurden im gesamten Tideablauf nur geringe Wasserbewegungen festgestellt (vgl. Abschnitt 4.3.1). Im Folgenden werden die bei sehr geringem Oberwasser der Weser gemessenen Salz- und Schwebstoffgehalte gegenübergestellt (Abb. 167 und 168).

Auffällig sind die hohen Salzgehaltsdifferenzen in der Weser (Pos. 6) bei der Springtide vom 27. Juni 2006. Bei Tnw wurden rd. 11 ‰ und bei Thw knapp 25 ‰ ermittelt (Abb. 167). Die Umkehr der Gefälle hatte sich bei $T\frac{1}{2}w$ vollzogen. Sehr beachtenswert sind auch die starken Vertikalgradienten der Salzgehalts- und Schwebstoffkonzentrationen bei Thw. Während der Ebbestromphase kehren sich die Verhältnisse um (Abb. 168).

Trotz der geringen Strömungen vor der Geesteeinfahrt sind die tideabhängigen Salzgehaltsunterschiede an den Molenköpfen von Interesse. Während der Flutstromphase ist ab Tidehalbwasser ein deutliches Gefälle vom Staupunkt (Pos. 4) zum Ablösepunkt (Pos. 5) der Flutströmungen auszumachen. Das ist ein Hinweis auf die im tieferen Wasser linksdrehenden Flutstromwalzen. Mit zunehmender Flutdauer verlagern sich die Walzen in die tieferen Wasserschichten und tragen an der Südmole das salzhaltigere Wasser vom Strom aus in den Vorhafen ein. Auch die höchsten Schwebstoffkonzentrationen gelangen bei Tidehochwasser mit der Flutstromwalze am Staupunkt an der Sohle ($C_s \approx 750 \text{ mg/l}$) in den Vorhafen. An der Oberfläche strömt das spezifisch leichtere Wasser aus dem Vorhafen heraus.

Ähnliche Bilder zeigen sich in Abb. 168 für die Ebbestromphase. Die Verhältnisse bei Tidehoch-

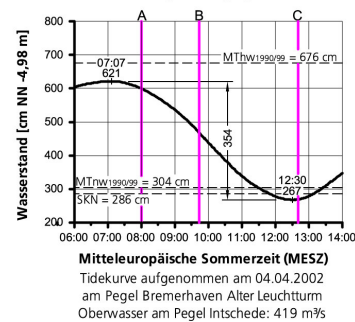
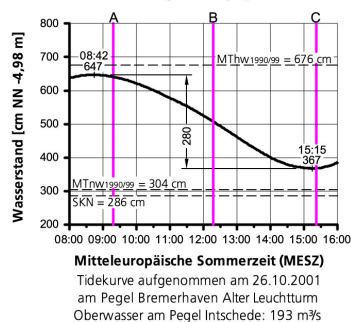
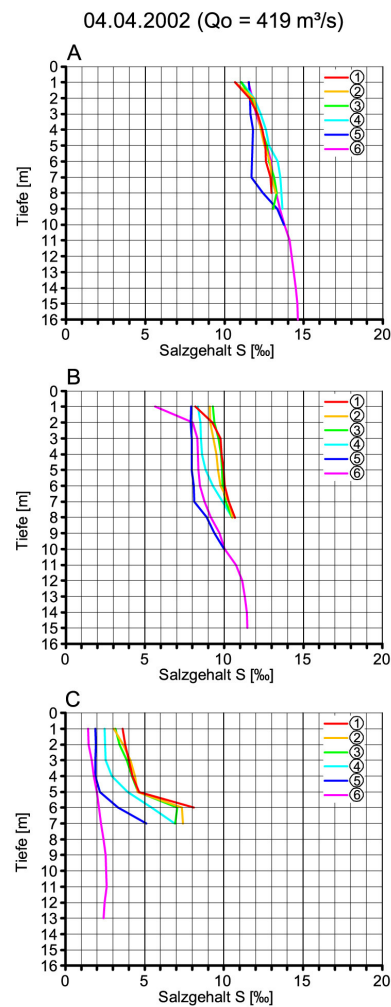
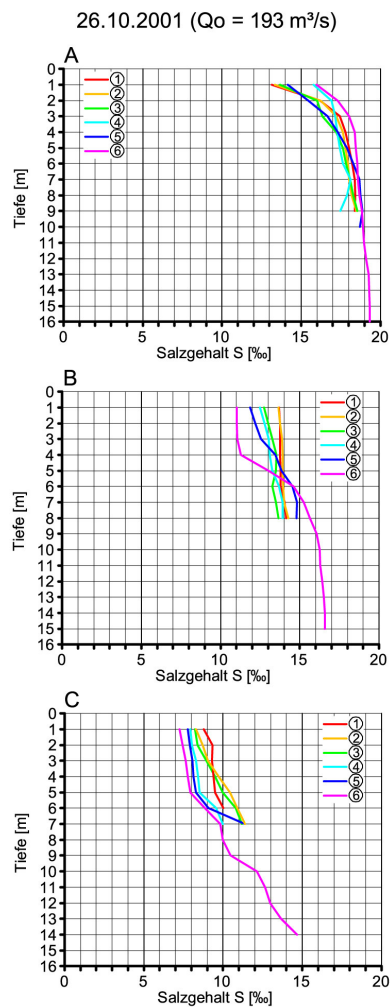
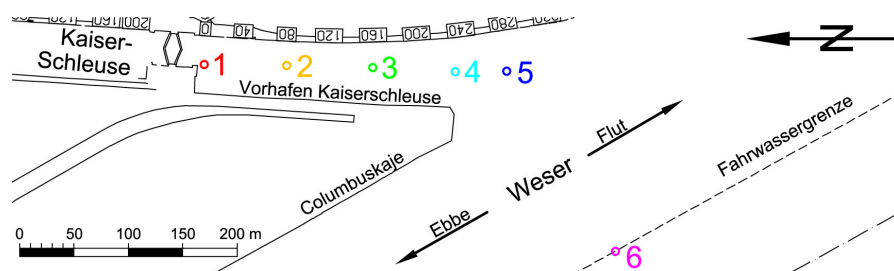
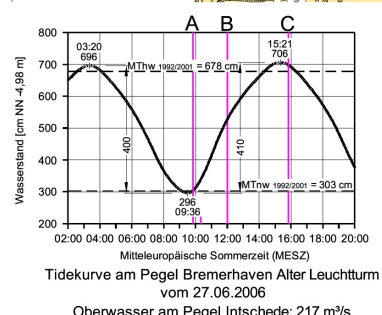
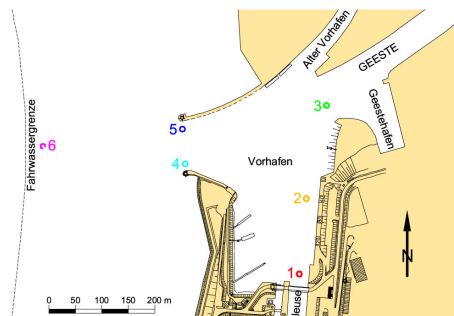


Abb. 166: Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen



Salzgehalte

Schwebstoffgehalte

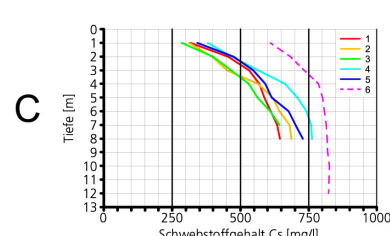
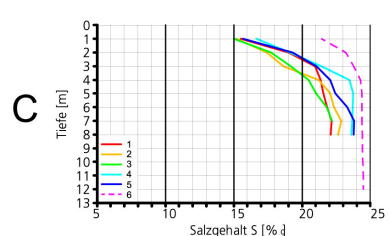
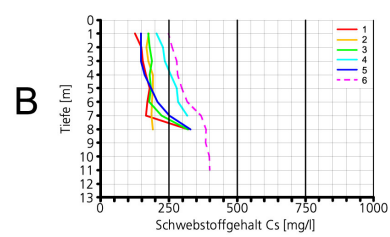
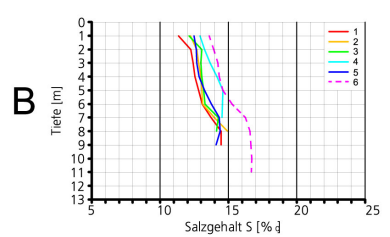
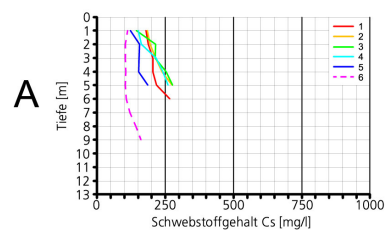
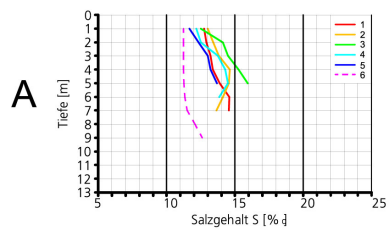
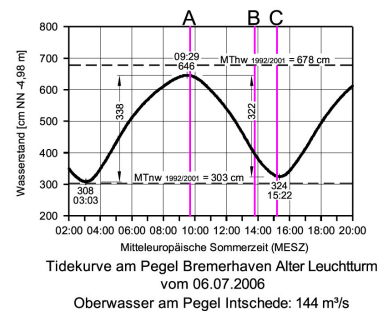
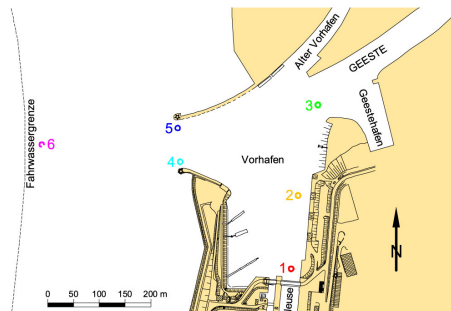


Abb. 167: Salz- und Schwebstoffgehalte während der Flutstromphase im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven am 27. Juni 2006



Salzgehalte

Schwebstoffgehalte

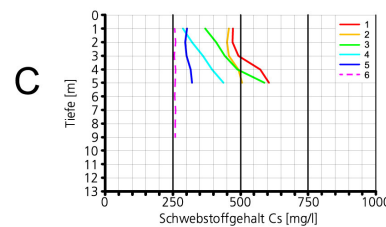
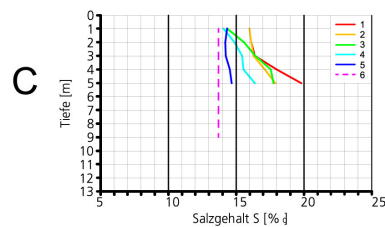
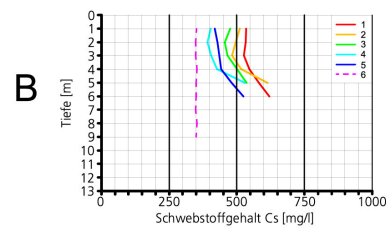
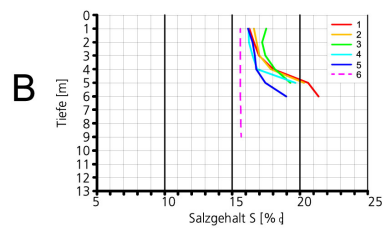
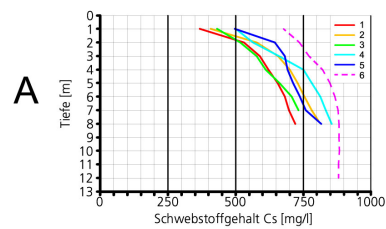
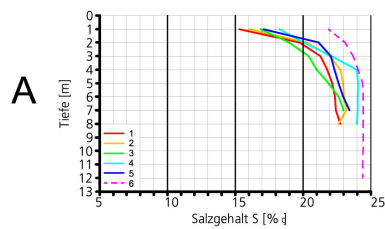


Abb. 168: Salz- und Schwebstoffgehalte während der Ebbestromphase im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven am 6. Juli 2006

wasser (Abb. 167C und Abb. 168A) stimmen bezüglich der Verteilungen und Größenordnungen der Salz- und Schwebstoffgehalte nahezu überein.

Die Umkehr der Salzgehaltsgefälle zwischen Tidestrom und Vorhafen vollzieht sich während der Ebbestromphase zu einem späteren Zeitpunkt als bei der Flut. Sowohl die Salzkonzentrationen als auch die Schwebstoffgehalte nehmen im Tideverlauf wieder ab und folgen zeitverzögert denen im Tidestrom (Abb. 168 A bis C).

Die höheren Salz- und Schwebstoffgehalte am 6. Juli 2006 während der niedrigen Wasserstände sind nicht allein auf das geringe Oberwasser am 27. Juni zurückzuführen (Abb. 167 und 168). Wasserverluste bei niedrigen Wasserständen in der Weser werden durch Zuwässerung bei hohen Tidewasserständen mit entsprechend salzhaltigerem Wasser ausgeglichen. Dieses Schleusungswasser hat am 6. Juli 2006 zu den relativ hohen Salz- und Schwebstoffkonzentrationen vor den Schleusenhäuptern (Pos. 1 in Abb. 168) geführt. Die Auftragungen in Abb. 168C dokumentieren die dadurch verursachten stärkeren horizontalen Gefälle im tieferen Wasser zur Hafeneinfahrt (Pos. 5 bis 1). Die insgesamt ausgeprägteren Vertikalgradienten bei den Salz- und Feststoffkonzentrationen in der späteren Flutstromphase (Abb. 167C und 168A) sind ursächlich für die Flutstromdominanz der Schwebstofftransporte in den Vorhafen.

Während der Ebbestromphase bilden sich in der Einfahrt rechtsdrehende Walzen mit dem Stau-punkt an der nördlichen Mole (Pos. 5) aus. Das spezifisch leichtere Wasser strömt im oberen Bereich in den Vorhafen. In den tieferen Schichten sind die Wasserbewegungen dichtebedingt nach außen gerichtet.

7.2.2 Emden

Die Salzgehaltsveränderungen in der Ems und dem Emder Vor- und Außenhafen während der Flutstromphase sind beispielhaft für geringes und erhöhtes Oberwasser ($Q_0 = 43 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_0 = 140 \text{ m}^3/\text{s}$) bei den Springtiden vom Juli 2000 und März 2001 in Abb. 169 dargestellt.

In Übereinstimmung mit den Untersuchungen für Bremerhaven sind während der Niedrigwasserstände auch in der Ems niedrigere Salzgehalte zu verzeichnen als in den angrenzenden Hafenbecken (Messung A in Abb. 169). Bemerkenswert ist das starke Gefälle innerhalb des rd. 1.400 m langen Außenhafens von etwa $S \approx 10 \text{ ‰}$ bei niedrigem Oberwasser. Gleichzeitig ist erkennbar, wie sich die Salzkonzentrationen im Vor- und Außenhafen durch die bis nach Thw andauernden Dichteströmungen an die der Ems annähern.

Das horizontale Salzgehaltsgefälle zwischen Ems und Hafen kehrt sich in der dritten Stunde nach Tnw um bei insgesamt geringer werdenden Vertikalgradienten der Salzgehaltsprofile (Messung B in Abb. 169).

Ab $T_{\frac{1}{2}}w$ werden über die sohlennahen Walzenströmungen die Dichteströmungen ausgelöst. Abb. 169 veranschaulicht, wie sich damit die vertikalen Salzgehaltsgefälle bei den Profilen im Hafenbereich wieder verstärken. Mit diesem Vorgang ist die Zunahme der absoluten Salzgehalte bis zum Eintritt des Tidehochwassers verbunden. Außerdem geht aus Abb. 169 die phasenverschobene Erhöhung der Salzgehalte innerhalb des Hafens zwischen den äußeren (Position 3 und

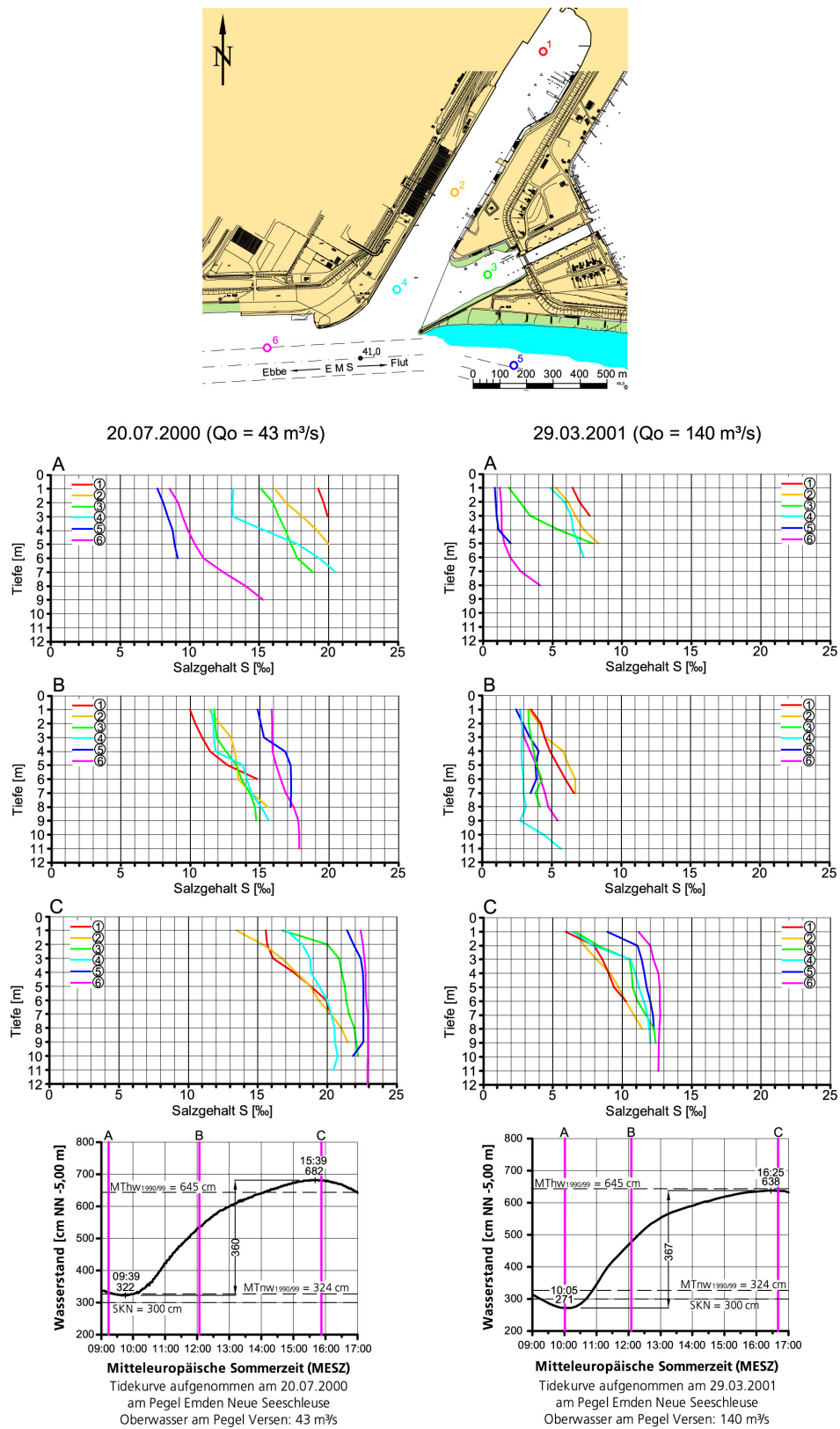


Abb. 169: Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen

4) und inneren Messstellen (Position 1 und 2) hervor.

Trotz der wegen des höheren Oberwassers insgesamt geringeren Salzkonzentrationen im März 2001 sind die Horizontal- und Vertikalverteilungen bei Tnw und Thw (Abb. 169, A und C) in sich vergleichbar. Mit den Profilen der mittleren Messung B wird die sich bei $T\frac{1}{2}w$ vollziehende Umkehrung des Dichtegefälles zwischen Vorhafen und Ems aufgezeigt. Die Julimessung 2000 wurde dabei zu einem späteren Tidezeitpunkt aufgenommen als die vom März 2001 (Abb. 169 Mitte).

Die bei Nipptiden im Juli 2000 ($Q_o = 47 \text{ m}^3/\text{s}$) und März 2001 ($Q_o = 199 \text{ m}^3/\text{s}$) ausgeführten Messungen vervollkommen das für die Flutströmungen aufgezeigte Bild Abb. 170.

Bei Tidehochwasser sind die Salzgehalte in der Ems deutlich höher als im Vorhafen (Messung A, Abb. 170). Bei Tideniedrigwasser (Messung C, Abb. 170) wurde, wie bei der Flutmessung im Juli 2000, ein horizontales Gefälle von rd. $S \approx 10 \text{ ‰}$ zwischen Position 1 und der Ems registriert. Bei dem hohen Binnenabfluss im März 2001 betrug es etwa die Hälfte.

Die Umkehr des Horizontalgradienten vollzieht sich in der zweiten Stunde nach Thw. Ab $T\frac{1}{2}w$ verstärkt sich das Gefälle vom Hafen zur Ems mit zunehmender Ebbedauer und sich intensivierenden Dichteströmungen. Bezeichnend ist wieder das besonders starke horizontale Gefälle bei Tnw und geringem Q_o . Ebenso die ausgeprägten Vertikalgradienten in der Hafeneinfahrt (Position 4) bei Thw und Tnw, sowie die relativ geringen Unterschiede bei Tidehalbwasser. Wie für die Flutstromverhältnisse gilt auch bei Ebbestrom, dass die Salzkonzentrationen bei erhöhtem Oberwasser der Ems zwar durch die damit verbundene Verschiebung der Brackwasserzone zur Außenems absolut geringer werden. Durch die tideabhängigen Gradienten des Salzgehaltes werden jedoch auch bei höheren Binnenabflüssen Dichteströmungen im angrenzenden Vor- und Außenhafen angeregt. Das wurde mit den Strömungsmessungen vom November 2002 (Abb. 86 und 87) nachgewiesen.

Abschließend bleibt festzustellen, dass die für den Dichteeffekt in den brackwasserbeeinflussten Vorhäfen der Weser und Ems maßgebenden, im Tiderhythmus veränderlichen Salzgehalte trotz der unterschiedlichen Randbedingungen miteinander vergleichbar sind. Im Emder Außenhafen kommt es dabei wegen der relativ großen Länge von rd. 1.400 m vor allem während der Ebbe bei niedrigen Tidewasserständen zu besonders starken Salzgehaltsgefällen zwischen dem Außenhaupt der Nesserlander Schleuse und der Ems.

7.2.3 Brunsbüttel

Die tideabhängigen Salzkonzentrationen in den Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal sind insgesamt schwächer als in Emden und Bremerhaven. Allgemein gültig ist es, dass die Salzgehalte in den Vorhäfen denen in den Tideströmen verzögert folgen. Bei Tideniedrigwasser wurden in allen Revieren geringere Salzgehalte im Tidefluss als in den Vorhäfen gemessen. In der Tidehochwasserphase sind die Konzentrationen in den Vorhäfen niedriger als in den Flüssen.

Die in Abb. 171 aufgetragenen Messungen zeigen die Situation im Neuen Vorhafen bei etwa mittleren Tiden und unterschiedlichen Binnenabflüssen. Die horizontalen Salzgradienten kehren

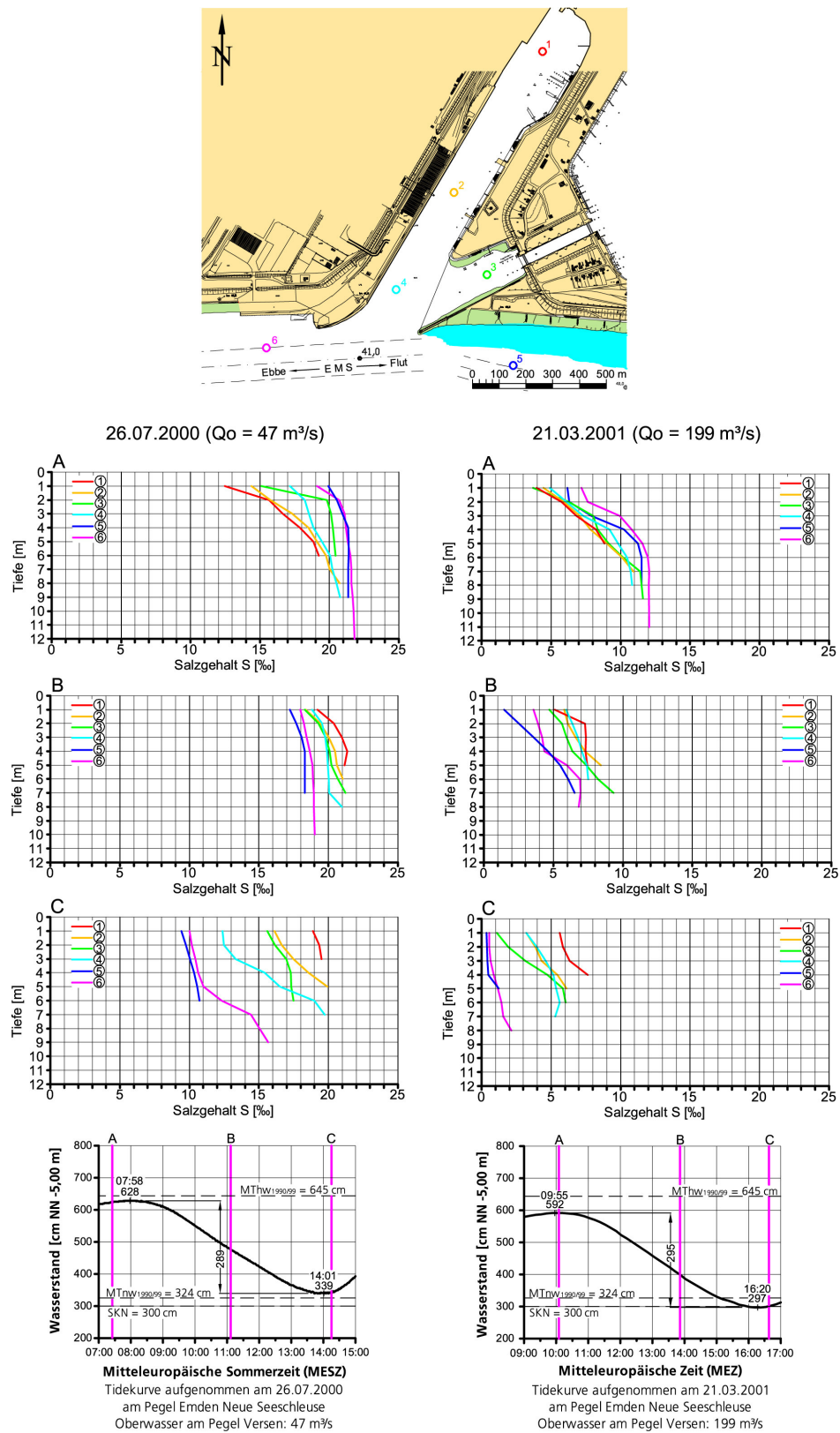


Abb. 170: Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich des Emden Vor- und Außenhafens bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen

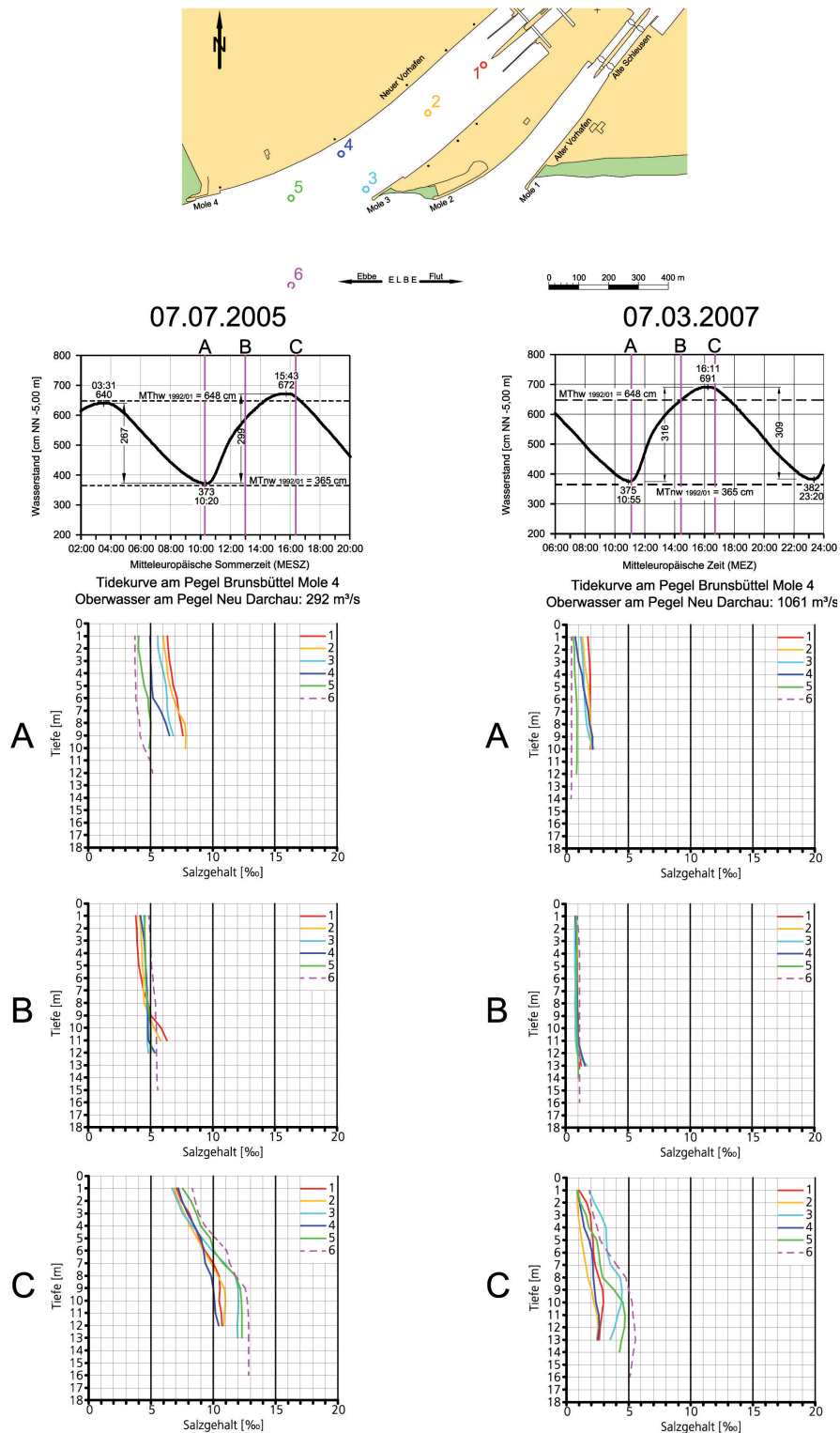


Abb. 171: Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser

sich nach $T_{\frac{1}{2}w}$ um. Bei dem höheren Oberwasser im März 2007 (Abb. 171, rechts) sind die Salzkonzentrationen geringer. Sie liegen im oberen oligohalinen Brackwasserbereich der Unterelbe. Die Gradienten der Salzgehalte sind ebenfalls schwächer ausgeprägt als im Juli 2005. Außerdem kehren sich die Gefälle zu einem späteren Tidezeitpunkt um (Abb. 171, Messung B). Etwas stärkere Vertikalgradienten der Salzkonzentrationen wurden im März 2007 lediglich während der Flutstromphase bei hohen Tidewasserständen ermittelt. Die flutstromorientierten Dichteströmungen sind bei geringen und erhöhtem Oberwasser stärker ausgeprägt als die ebbestromorientierten Dichteeffekte während der Niedrigwasserphase. Dieser Umstand führt auch in den Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal zu dem hohen Feststoffeintrieb während der Flutstromphase. Die in Abb. 171 im Bereich des Neuen Vorhafens sehr unterschiedlichen Verteilungen der Salzgehalte in horizontaler und vertikaler Richtung sind neben der Lage, Geometrie und dem Ausbauzustand des Vorhafens ursächlich für die Intensität der Austauschvorgänge. Die insgesamt stärkeren Gradienten der Salzkonzentrationen im Juli 2005 (Abb. 171, linke Seite) haben die deutlich ausgeprägten Strömungs- und Dichteeffekte im Bereich des Neuen Vorhafens während der Flutstromphase zur Folge (vgl. Abb. 115 und 118). Im März 2007 wurden nur geringe Salzkonzentrationen mit entsprechend unbedeutenden Gradienten gemessen (Abb. 171, rechte Seite). Dementsprechend gering waren die strömungs- und dichtebedingten Wasserbewegungen im Neuen Vorhafen der Nord-Ostsee-Kanal-Schleusen.

Die Leitfähigkeitsmessungen im Alten Vorhafen und der Elbe wurden ebenfalls bei etwa mittleren Tideverhältnissen und deutlich voneinander abweichendem Oberwasser durchgeführt (Abb. 172). Im März 2007 war bei niedrigen Wasserständen und höherem Oberwasser in der Elbe nur noch sehr geringe Salzkonzentrationen $S < 1 \text{ ‰}$ vorhanden (Abb. 172 und 171, Messung A, rechts). Bei den geringen Abflüssen in Neu Darchau wurden in den Vorhäfen etwas stärkere horizontale und vertikale Gradienten während der Niedrigwasserphase registriert. Die flutstromorientierten Strömungseffekte stellen sich im Alten Vorhafen bei höherem Oberwasser ebenfalls erst zu einem späteren Tidezeitpunkt nach Umkehr der Salzgehaltsgefälle (Abb. 172, B rechte Seite) ein. An den stärkeren Gradienten der Salzgehalte bei Thw (Messung C) ist abzulesen, dass die Austauschvorgänge in der Flutstromphase ausgeprägter sind als bei Tideniedrigwasser (Abb. 172). Bei genauerer Betrachtung der Abb. 171 und 172 ist erkennbar, dass die Salzgehalte im März 2007 nicht nur absolut geringer sind. Die Gradienten sind bei den ebbestromorientierten Dichteströmungen während der Niedrigwasserphase auch schwächer ausgeprägt.

Die Ebbmessungen zeigen die Salzgehaltsverhältnisse im Neuen Vorhafen (Abb. 173) unter Nipptidebedingungen und in umgekehrter Reihenfolge. Die bei vergleichbaren Oberwasserverhältnissen wie bei der Flut vom 7. Juli 2005 durchgeführten Ebbmessungen vom 30. Juni 2005 zeigen ähnliche Gradienten der Salzgehaltsverteilungen bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser (Abb. 171 und 173, linke Seiten). Da bei Nipptiden weniger Wassermengen mit geringerer Energie stromauf gelangen sind die Salzgehalte bei der Ebbmessung folglich deutlich niedriger. Maßgebend für die Anregung der Dichteströmungen sind die Gradienten der Salzgehalte.

Vier Tage nach dem Höchstabfluss des Hochwasserereignisses in Neu Darchau ($Q_0 = 1270 \text{ m}^3/\text{s}$) betrug der Tidefall in Brunsbüttel am 15. März 2007 lediglich 217 cm. Das Zusammentreffen

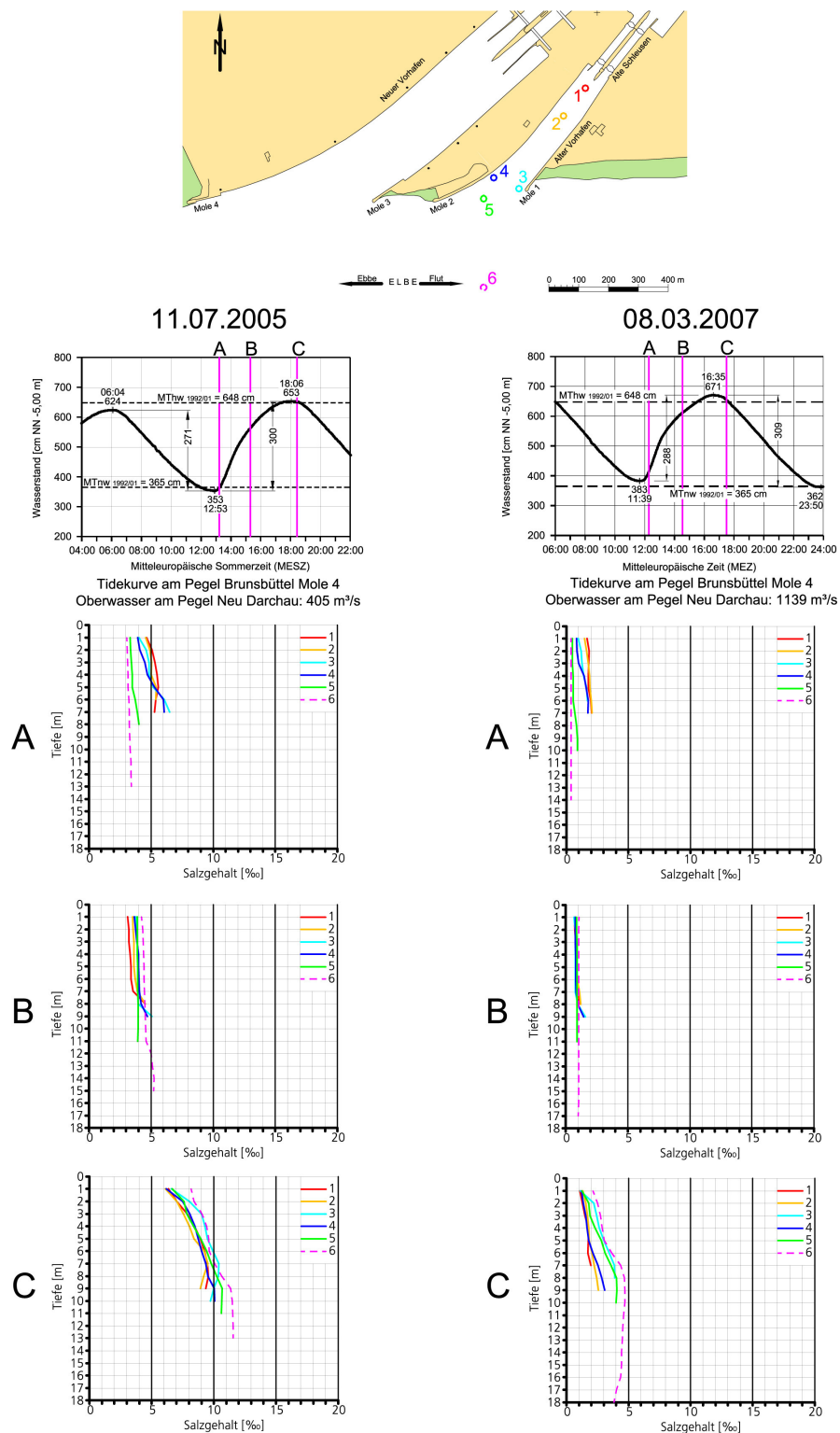


Abb. 172: Salzgehalte während der Flutphase im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser

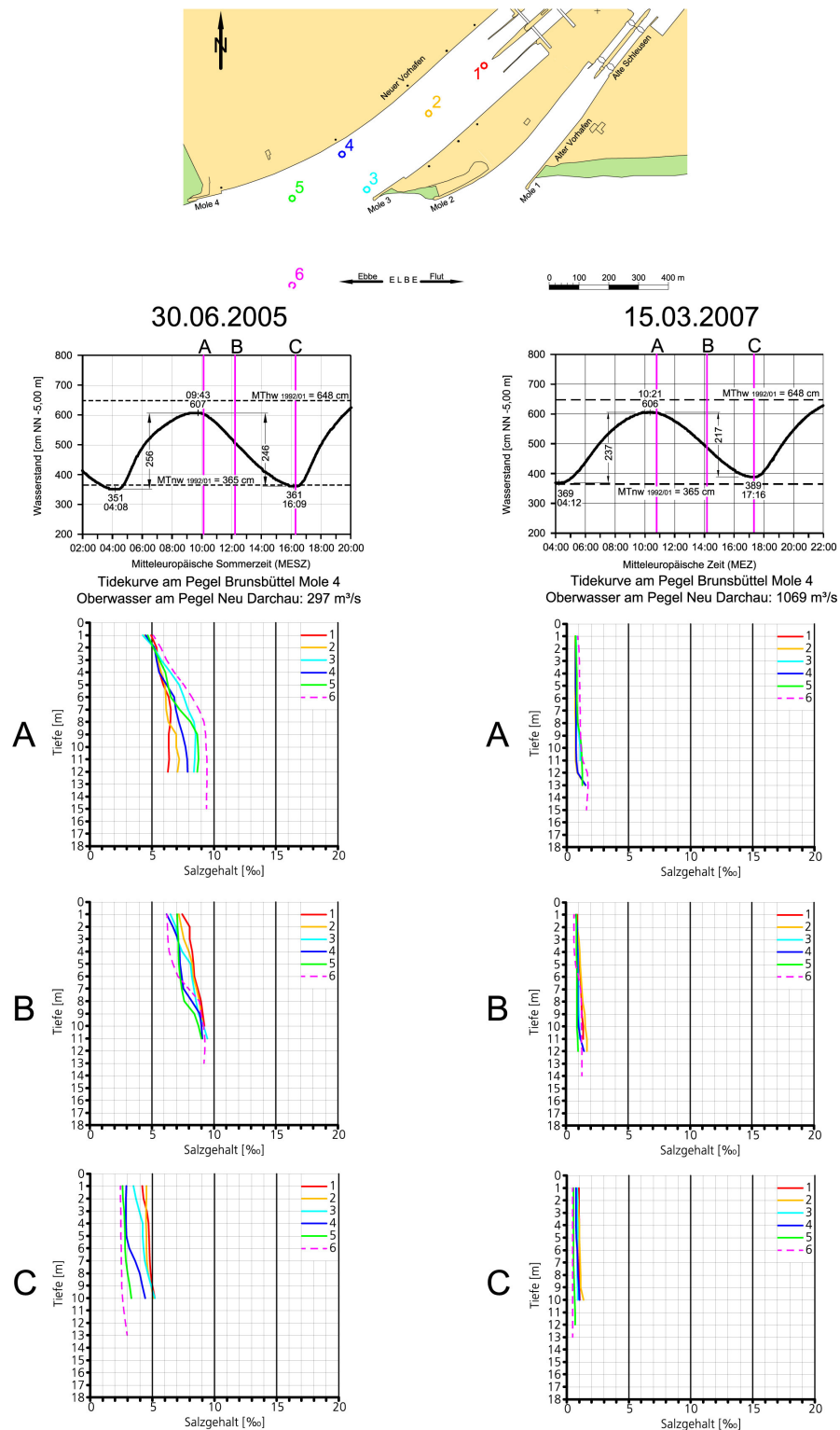


Abb. 173: Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser

dieser Ereignisse hatte dazu geführt, dass während der Ebbephase im Neuen Vorhafen und davor nur noch sehr geringe Salzgehalte ohne nennenswerte Gradienten gemessen wurden (Abb. 173). Folglich wurden am Vortag bei vergleichbaren Tide- und Oberwasserbedingungen nur sehr schwache Dichteströmungen im Neuen Vorhafen mit den ADCP-Messungen festgestellt (vgl. Abb. 125 und 126 mit Abb. 121 bis 124).

Ähnliche Verhältnisse sind für den Alten Vorhafen in Abb. 174 dargestellt. Den gegenüber dem Neuen Vorhafen insgesamt schwächeren Salzgehaltsgefällen entsprechend sind auch die Strömungs- und Dichteeffekte aufgrund der geringeren Abmessungen und Ausbautiefe insgesamt weniger stark ausgeprägt. Bei den geringen Salzgehaltsunterschieden im März 2007 (Abb. 174) wurden bei den Ebbemessungen nur sehr schwache Wasserbewegungen im Alten Vorhafen ermittelt (vgl. Abb. 133 und 134 mit Abb. 131 und 132).

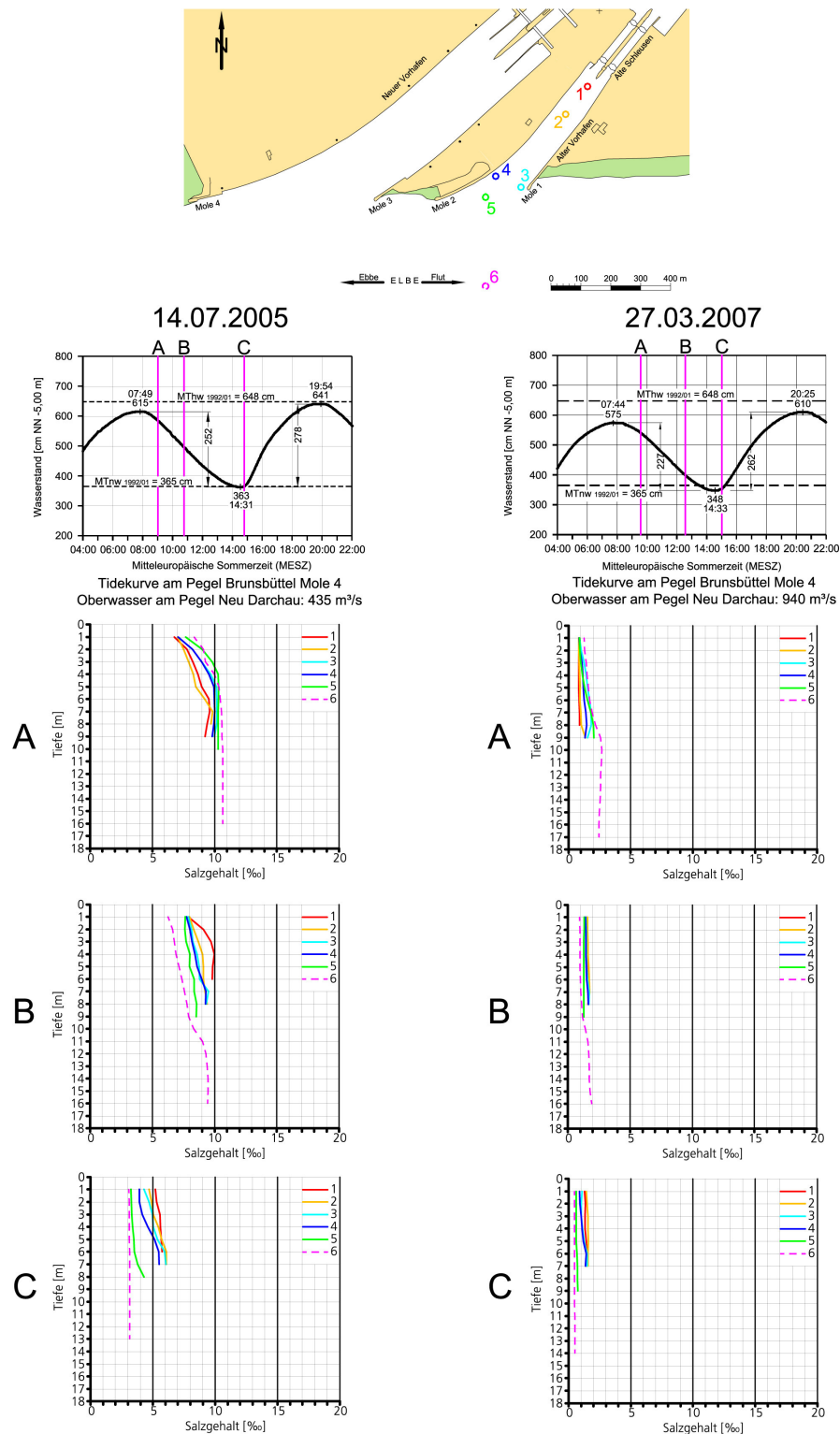


Abb. 174: Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser

7.3 Überlagerung von Strömungs-, Dichte- und Tideeffekten

Die sich in den Brackwasserhäfen überlagernden hydrodynamischen Abläufe im Tiderhythmus unterliegen sehr komplexen Bedingungen. In Abb. 175 sind schematisch die Wasserstände, Strömungen und die im Tideablauf veränderlichen Salzgehaltsunterschiede zwischen Fluss (S_{Fl}) und Hafenbecken (S_{Ha}) dargestellt.

Mit den Messungen in der Natur wurde festgestellt, dass die Salzgehalte in den Brackwasserhäfen phasenverschoben denen im Tidestrom folgen. Dementsprechend sind die Salzgehaltskonzentrationen bei Tidehochwasser im Strom höher als in den Vorhäfen. Bei Tideniedrigwasser ist es entgegengesetzt. Die Salzgehaltsgefälle zwischen Tidestrom und Vorhäfen kehren sich während der Flut- und Ebbestromphasen um und damit auch die Dichteströmungen in den Vorhäfen. Ebenso wie die Verspätung der Kenterungen sind die Umkehrzeiten der Salzgehaltsgefälle in den einzelnen Revieren verschieden. Das hängt u. a. von der Lage der Häfen in der Brackwasserzone und den unterschiedlich starken Reflexionserscheinungen der Tidebewegung zusammen.

Die Überlagerung von Tideeffekt und Dichteeffekt können vereinfacht in 4 Abschnitte unterteilt werden. In Abb. 175 sind dazu die Füll- und Entleerungsvorgänge durch die Tideeffekte für die Flut- und Ebbephase eingetragen. In der ersten Flutphase (1) ist die sohlennahe Dichteströmung aus und in der zweiten (2) wie der Tideeffekt in den Hafen gerichtet. Während der Ebbephase (3) und (4) ist es entgegengesetzt. Die transportintensivsten Strömungen in den Vorhafen treten danach in der Flutphase (2) auf.

Die Überlagerung von Strömungs- und Dichteeffekten können vereinfacht in zwei Flut- und Ebbephase eingeteilt werden.

In der ersten Flutstromphase nach der Ebbestromkenterung K_e sind die Salzkonzentrationen im Vorhafen größer als im Tidestrom (Phase A in Abb. 175). Mit einsetzender Flutströmung findet der horizontale Wasseraustausch über die in den oberen Wasserschichten der Hafeneinfahrt drehenden Flutstromwalze statt (Abb. 176 A). Der vertikale Austausch vollzieht sich über die sohlennah aus dem Hafen strömenden Wassermengen. Von der Flutstromwalze aus strömt das spezifisch leichtere Wasser aus dem Strom oberflächennah in das Hafenbecken. Mit zunehmender Flutstromdauer und Umkehrung der Salzgehaltskonzentrationen bei $T_{\frac{1}{2}w}$ verlagert sich der horizontale Wasseraustausch über die sohlennah drehende Flutstromwalze in der Hafeneinfahrt (Phase B in Abb. 175 und 176). Der vertikale Wasseraustausch wird mit den dichtebedingten sohlennah in und oberflächlich aus dem Vorhafen strömenden Wassermengen bewirkt.

Nach der Flutstromkenterung (K_f) sind die Salzgehalte im Tidestrom noch höher als im angrenzenden Vorhafen. In der ersten Ebbestromphase (C in Abb. 175) findet der horizontale Wasseraustausch durch den Strömungseffekt an der Sohle statt (Abb. 177 C). Von der Walze aus strömt das salzigere Flusswasser unten in den Vorhafen und verdrängt das spezifisch leichtere Wasser oben aus dem Vorhafen. In der Hauptebbestromphase D (Abb. 175) verändern sich mit der Umkehrung der Salzgehaltsgefälle bei $T_{\frac{1}{2}w}$ die Strömungen im Vorhafen. Aufgrund der geringeren Salzgehalte im Tidestrom werden die Ebbestromwalzen in der Hafeneinfahrt in den oberen Wasserschichten angeregt (Abb. 177 D). Die Drehrichtung der Dichtestromwalze mit

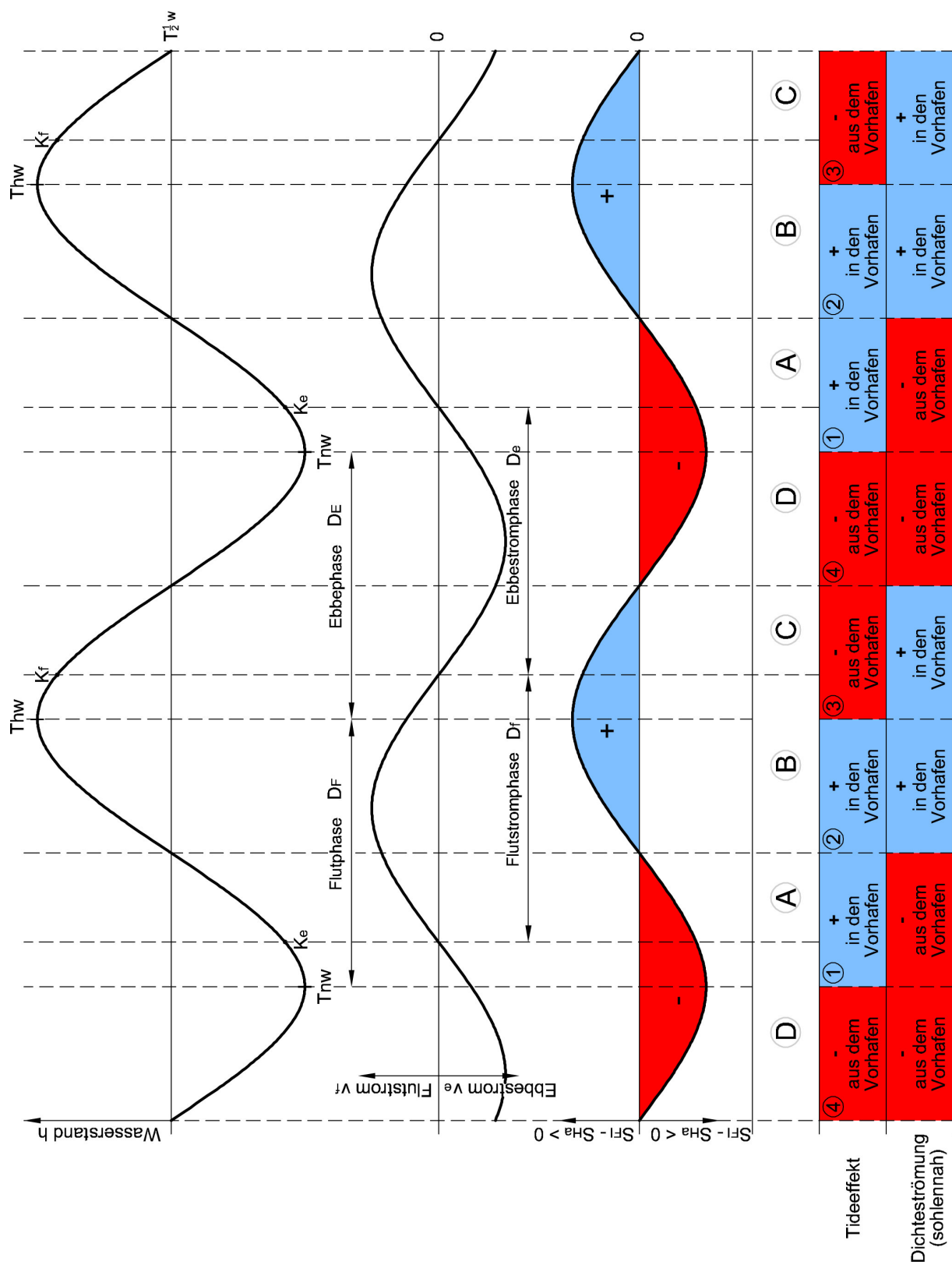


Abb. 175: Tidewasserstände, Tideströmungen im Strom und Salzgehalte, schematisch

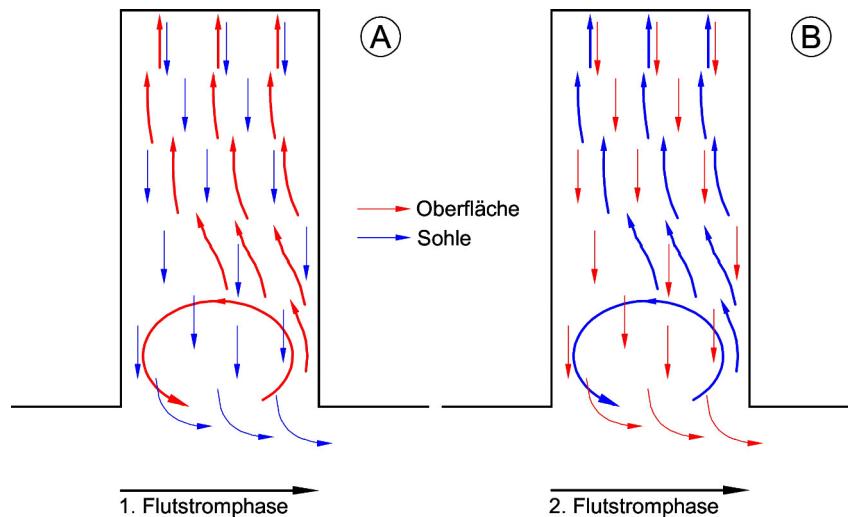


Abb. 176: Strömungs- und Dichteeffekt während der Flutstromphase, schematisch

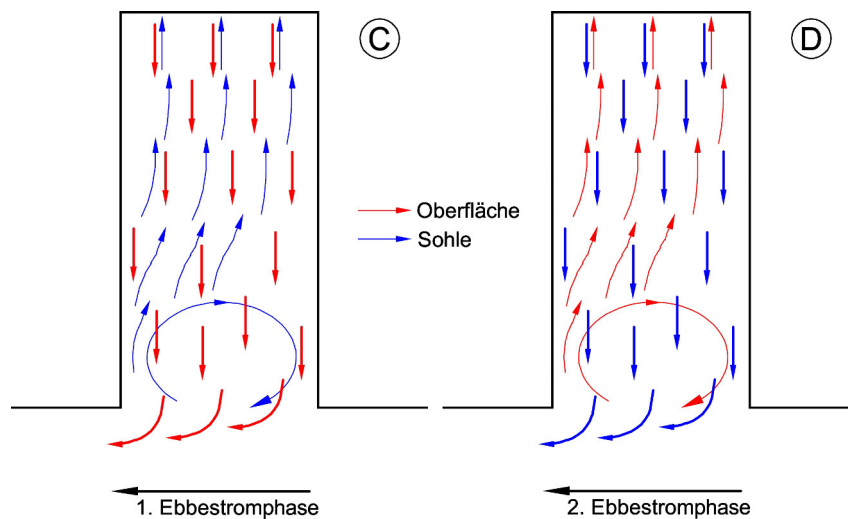


Abb. 177: Strömungs- und Dichteeffekt während der Ebbestromphase, schematisch

horizontaler Achse kehrt sich in der Hauptebbestromphase um (Abb. 177 C und D).

Die transportwirksamsten sohlennahen Walzen- und Dichteströmungen treten in der Flutstromphase auf (Abb. 176 B). In Überlagerung mit dem in den Vorhafen gerichteten Tideeffekt führt das zur positiven Feststoffbilanz in den Brackwasserhäfen. Die in der 2. Ebbestromphase bis zur 1. Flutstromphase wirkenden hydraulischen Vorgänge (Abb. 177 D und 176 A) sind zu schwach um die während der anderen Tidephasen (Abb. 176 B und 177 C) in die Vorhäfen transportierten Feststoffe wieder auszuräumen.

8 Fluid Mud Untersuchungen

8.1 Peilplananalysen

8.1.1 Vorbemerkungen

Mit der Analyse doppeltfrequenter Peilungen lassen sich die Mächtigkeiten und das Volumen von Flüssigschlick ermitteln. Für die Reviere an der Weser, Ems und Elbe sind dazu Peilungen ausgewertet worden. In den Brackwasserzonen der norddeutschen Tideflüsse bildet sich in den strömungsberuhigten Zonen der Vorhäfen verflüssigter Schlick (Fluid Mud) mit bis zu mehreren Metern Mächtigkeit. Die Schichtstärken und das Volumen von Fluid Mud ist mit den Differenzen aus nieder- und hochfrequenten Echolotsignalen zu bestimmen. Der Flüssigschlick wird durch die Seeschleusen bis in die abgeschleusten Hafenbereiche eingetragen.

8.1.2 Bremerhaven

Die für den Zeitraum von 2001 bis 2004 betrachteten Flächen im Bereich der Nord-, Kaiser- und Doppelschleuse in Bremerhaven sind in Abb. 178 dargestellt. Die zugehörigen Solltiefen sind auf das in der Zeit gültige Seekartennull (SKN), dem mittleren Springtidenniedrigwasser (MSpTnw) bezogen worden ($SKN = -2,12 \text{ m NN} = \text{MSpTnw}$).

Die Fluid Mud Stärken und Mengen schwanken in den höher gelegenen Vorhäfen der Nord- und Kaiserschleuse erheblich um den 4-jährigen Mittelwert. Das in Tafel 1 eingetragenen mittleren Volumen von $V \approx 26.000 \text{ m}^3$ im Vorhafen der Nordschleuse wurde bis zu rd. 70 % über- und bis etwa 80 % unterschritten. Die Auswertungen für den Vorhafen der Kaiserschleuse ergaben Abweichungen vom Mittelwert ($V \approx 20.000 \text{ m}^3$) bis zu rd. 65 %. Im Zufahrtsbereich zur Doppelschleuse (Geeste und Vorhafen) herrschten ausgeglichene Verhältnisse. Für den Beobachtungszeitraum 2001 bis 2004 lagen die Abweichungen vom Mittelwert ($V \approx 116.000 \text{ m}^3$) bei maximal 25 %.

Trotz der vergleichsweise geringen Wassertiefen sind im Zufahrtsbereich zur Doppelschleuse die größten Unterschiede zwischen den Echolothorizonten (Fluid Mud-Stärken) zu verzeichnen (Tafel 1). Das liegt, ebenso wie die konstanteren Mengen an den besonderen morphologischen Bedingungen. An der Geesteeinfahrt befindet sich eine stabile Sandbarre, die die Wassertiefe dort auf rd. -5 m SKN begrenzt. Die Drenpel der großen Schleusenammer liegen mit -8,38 m SKN, ebenso wie die mittleren Sohliefen in der Geeste mit -6,68 m SKN und im östlichen Vorhafen mit -7,52 m SKN um rd. 1,7 m bis 3,40 m unter der Wassertiefe im Einfahrtsbereich der Geeste. In dem strömungsberuhigten, tiefer liegenden Bereich zwischen Barre und Außenhäuptern bestehen damit gute Voraussetzungen für die Bildung von Flüssigschlick und dessen Konsolidierung.

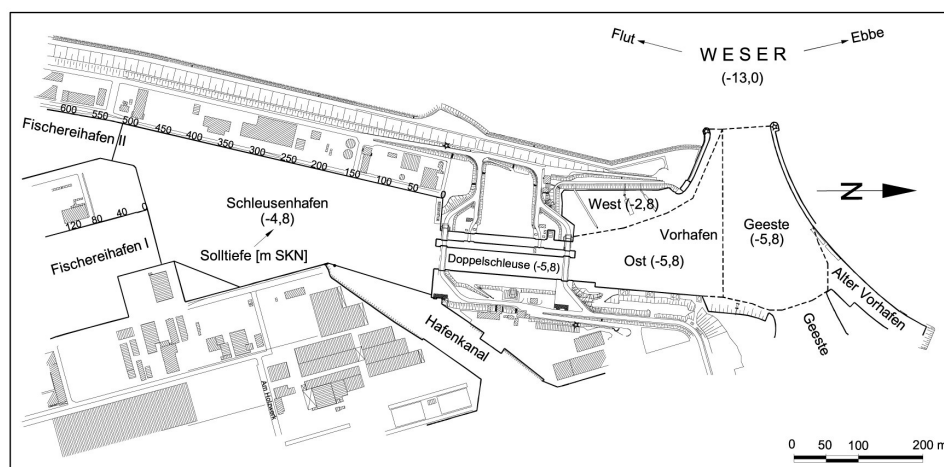
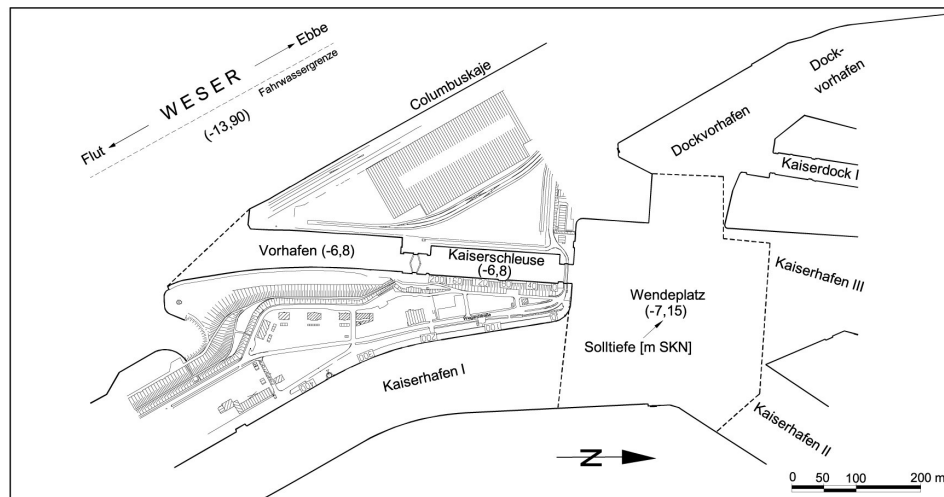
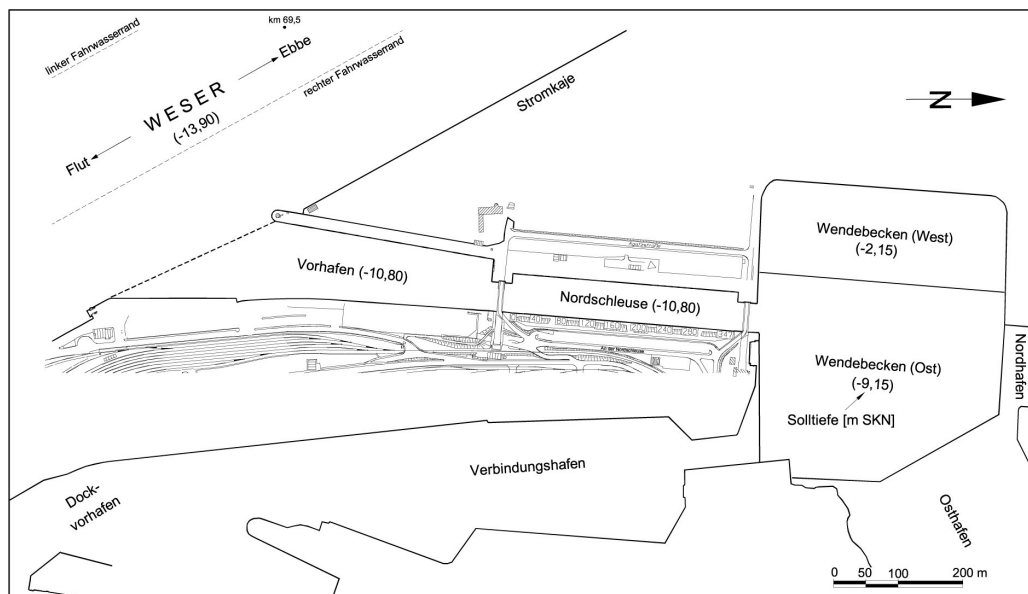


Abb. 178: Untersuchungsbereiche in Bremerhaven und zugehörige Solltiefen (m SKN)

Nordschleuse	Fläche A [m²]	Solltiefe [m SKN]	Mittlere Sohlentiefe [m SKN]		Fluid-Mud	
			15 kHz	210 kHz	Höhe h [m] 15kHz-210kHz	Volumen V [m³] h · A
Vorhafen	43.725	-10.80	-10.61	-10.02	0.59	25.798
Kammer	21.564	-10.80	-10.95	-10.40	0.55	11.860
Wendebecken West	46.275	-2.15	-2.47	-2.13	0.34	15.734
Wendebecken Ost	102.925	-9.15	-9.22	-8.84	0.38	39.112
Zwischensumme	214.489					92.503

Kaiserschleuse	Fläche A [m²]	Solltiefe [m SKN]	Mittlere Sohlentiefe [m SKN]		Fluid-Mud	
			15 kHz	210 kHz	Höhe h [m]	Volumen V [m³]
Vorhafen	16.825	-6.80	-8.26	-7.06	1.20	20.190
Kammer	9.344	-6.80	-7.22	-6.50	0.72	6.728
Wendeplatz	89.700	-7.15	-9.04	-8.82	0.22	19.734
Zwischensumme	115.869					46.652

Doppelschleuse	Fläche A [m²]	Solltiefe [m SKN]	Mittlere Sohlentiefe [m SKN]		Fluid-Mud	
			15 kHz	210 kHz	Höhe h [m]	Volumen V [m³]
Geeste	31.800	-5.80	-6.68	-4.95	1.73	55.014
Vorhafen West	8.975	-2.80	-3.40	-2.82	0.58	5.206
Vorhafen Ost	26.450	-5.80	-7.52	-5.41	2.11	55.810
Grosse Kammer	7.446	-5.80	-7.08	-5.24	1.84	13.701
Kleine Kammer	2.362	-5.80	-6.14	-5.85	0.29	685
Schleusenhafen	75.588	-4.80	-4.70	-4.27	0.43	32.503
Zwischensumme	152.621					162.917

Summe	482.979					302.072
--------------	----------------	--	--	--	--	----------------

Tafel 1: Mittelwerte in den Hafenbereichen in Bremerhaven von 2001 bis 2004

Flächenbezogen wurden mit den Peilplananalysen folgende mittlere Mengen ermittelt (s. Tafel 1):

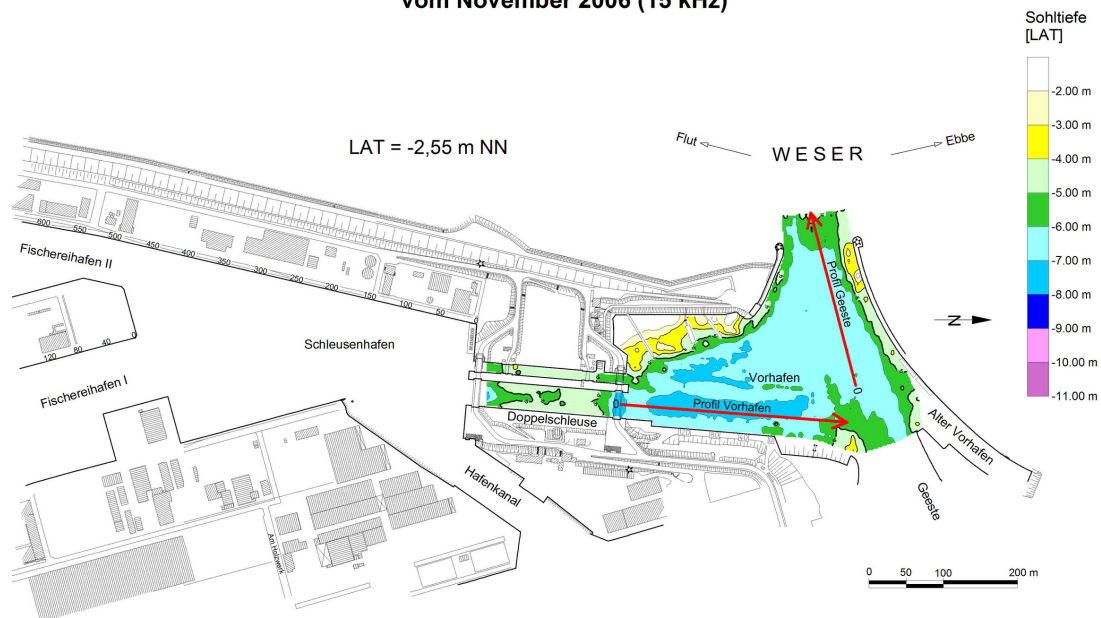
$$\begin{array}{ll} \text{Geeste} & \frac{V}{A} = h = 1,73 \text{ m} \\ \text{Östlicher Vorhafen} & \frac{V}{A} = h = 2,11 \text{ m} \end{array}$$

Selbst in der großen Schleusenkammer wurden noch $\frac{V}{A} = h = 1,84 \text{ m}$ und im Schleusenhafen $\frac{V}{A} = h = 0,43 \text{ m}$ berechnet.

Als Beispiel ist in Abb. 179 eine 15 kHz Peilung vom Zufahrtbereich zur Doppelschleuse in Bremerhaven und ein Differenzplan (210 kHz – 15 kHz Horizonte) vom November 2006 dargestellt. Die größten Differenzen wurden im Bereich des östlichen Schleusenvorhafens und am Außenhaupt der großen Schleuse mit $h \approx 3,00 \text{ m}$ ermittelt.

Die aus Abb. 179 entwickelten Längsprofile (Abb. 180) veranschaulichen den gleichmäßigeren Verlauf des 210 kHz-Horizonts mit den größeren Differenzen im östlichen Vorhafen, dort wo der 15 kHz-Horizont die größten Sohlthiefen aufweist. Im Barrenbereich der Geesteeinfahrt stimmen die Ergebnisse beider Peilfrequenzen annähernd überein (Abb. 180). Es bleibt festzustellen, dass die bathymetrischen Verhältnisse im Zufahrtbereich zur Doppelschleuse mit zunehmenden Sohlthiefen zur Doppelschleuse gute Voraussetzungen für die Bildung und Konsolidierung von Flüssigschlick bilden. Mit einem vertretbaren Aufwand ist es wohl nicht möglich, ein Sohlengefälle für den 15 kHz Horizont vom Außenhaupt über den Vorhafen und der Geeste bis zur Weser zu schaffen und freizuhalten. Die Methode, mit Wasserinjektionen die nautisch nutzbaren Tiefen zu gewährleisten, ist sicher die geeignetere Maßnahme.

**Peilung im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven
vom November 2006 (15 kHz)**



**Differenzplan im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven
zwischen dem 15 kHz- und 210 kHz-Horizont
Peilungen vom November 2006**

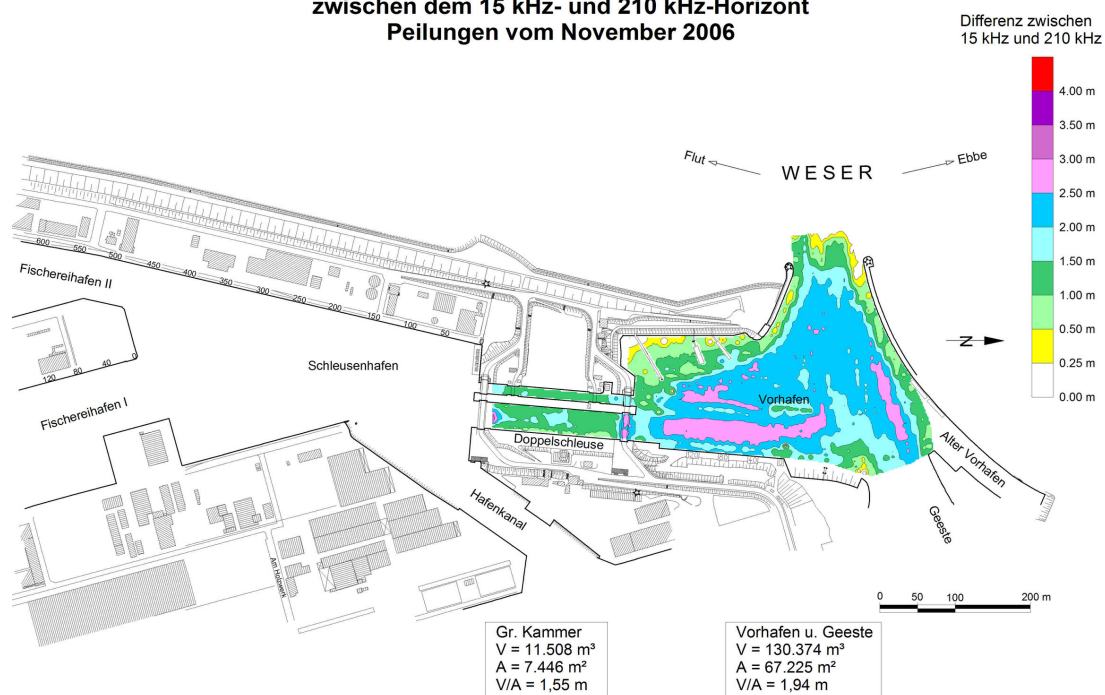


Abb. 179: Peilung und Differenzplan im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven vom November 2006

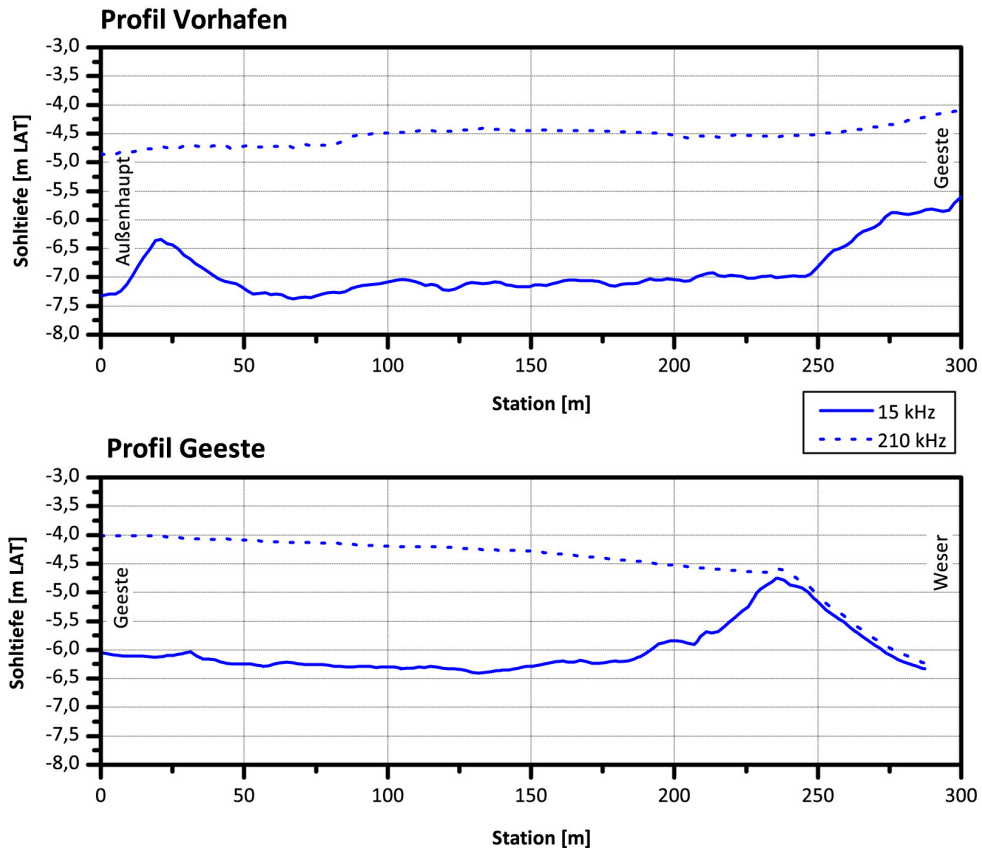


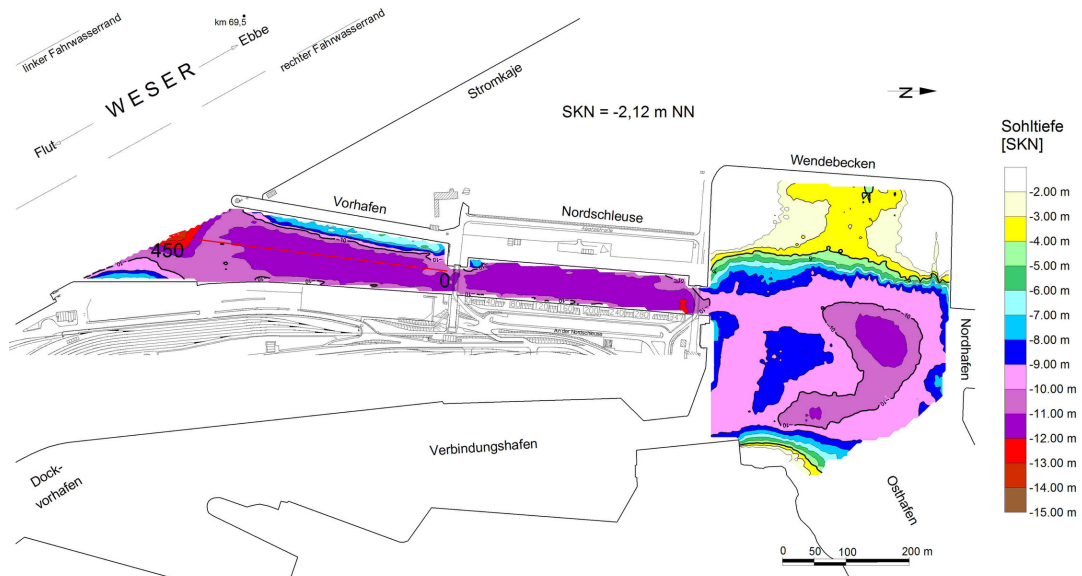
Abb. 180: Längsprofile im Vorhafen der Doppelschleuse und der Geeste vom November 2006

Auch in den gegenüber der Weser höher gelegenen Hafenzufahrten zum Überseehafen in Bremerhaven bilden sich durch die Strömungseffekte in den Vorhafenzufahrten Barren aus. Zum Februar 2003 war die Sohle im inneren Vorhafen der Nordschleuse und auch in der Kammer tiefer als in der Einfahrt (Abb. 181). Aufgrund der bathymetrischen Voraussetzungen betrugen die mittleren Schichtstärken (V/A) im Vorhafen und der Schleusenkammer etwa einen Meter. Die Schwebstoffe gelangen von der Weser über den Vorhafen und die Nordschleuse bis in den abgeschleusten Hafenbereich.

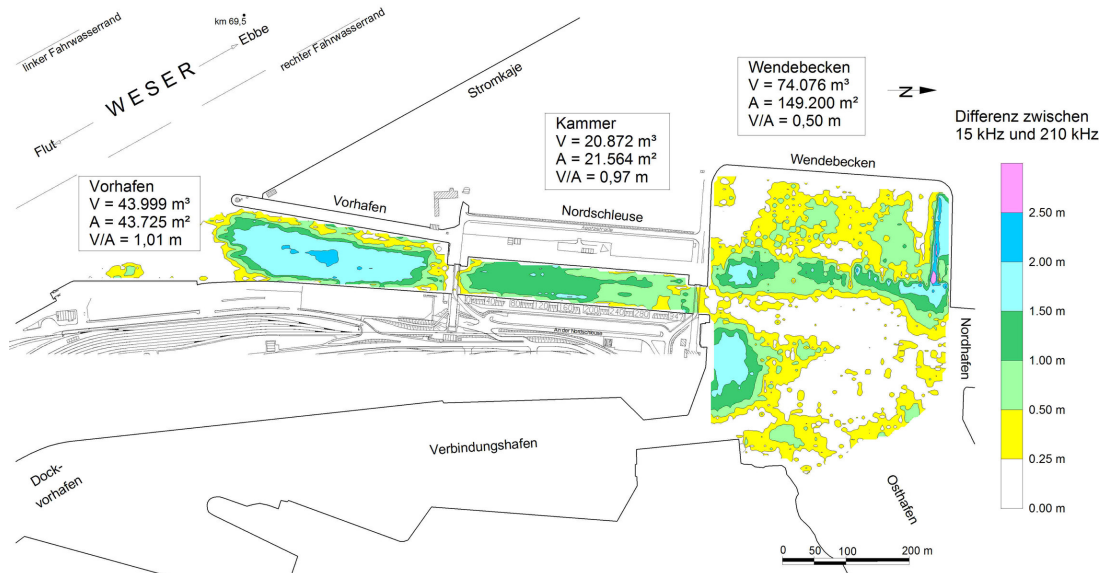
Ganz andere Verhältnisse wurden im Januar 2004 ermittelt (Abb. 182). Die erheblich geringeren Fluid Mud Mengen vom Vorhafen der Nordschleuse bis zum Wendebecken sind auf die günstigen Gefälleverhältnisse zurückzuführen. Der in Abb. 183 eingetragene Längsschnitt der Vorhafenaachse vom Februar 2003 veranschaulicht, wie sich im strömungsberuhigten Wannenbereich zwischen Schleuse und Barre Flüssigschlick bilden kann. In der Wanne hatten Sedimentationen und Konsolidierungen von Flüssigschlick stattgefunden.

Bei der Peilung vom Januar 2004 war keine Barre in der Einfahrt vorhanden (Abb. 183, unten). Bei geringen Unterschieden ist zwischen den hoch- und niederfrequenten Horizonten in Abb. 183 unten ein Gefälle von der Nordschleuse zur Weser auszumachen. Dadurch wird die während der Flutstromphase nach innen gerichtete Dichteströmung an der Sohle geschwächt. Die Transportkapazität der nach außen gerichteten ebbestromorientierten Sohlströmungen wird

**Peilung im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven
vom Februar 2003 (15 kHz)**

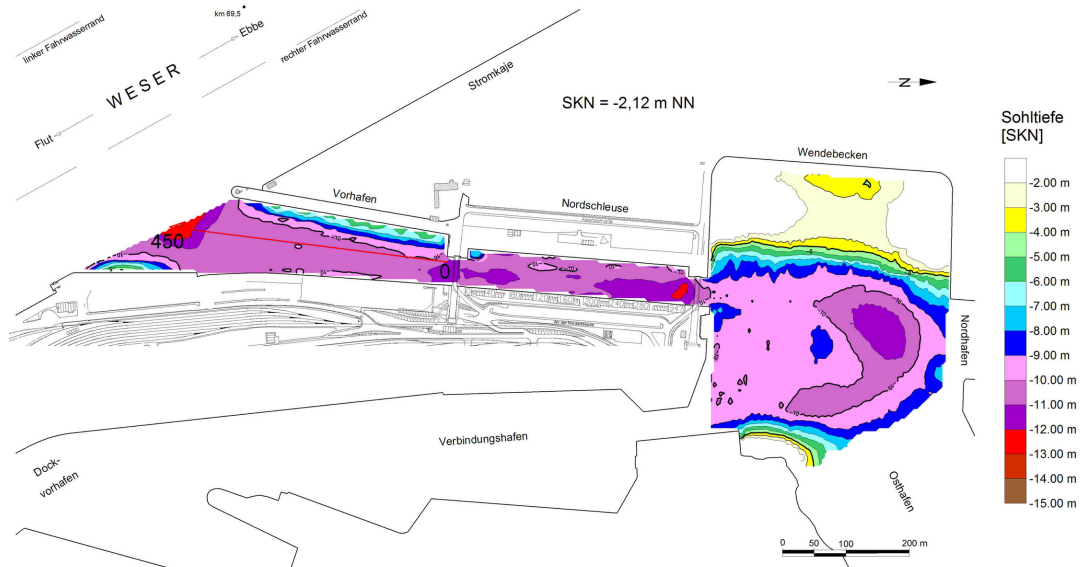


**Differenzplan im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven
zwischen dem 15 kHz- und 210 kHz-Horizont
Peilungen vom Februar 2003**

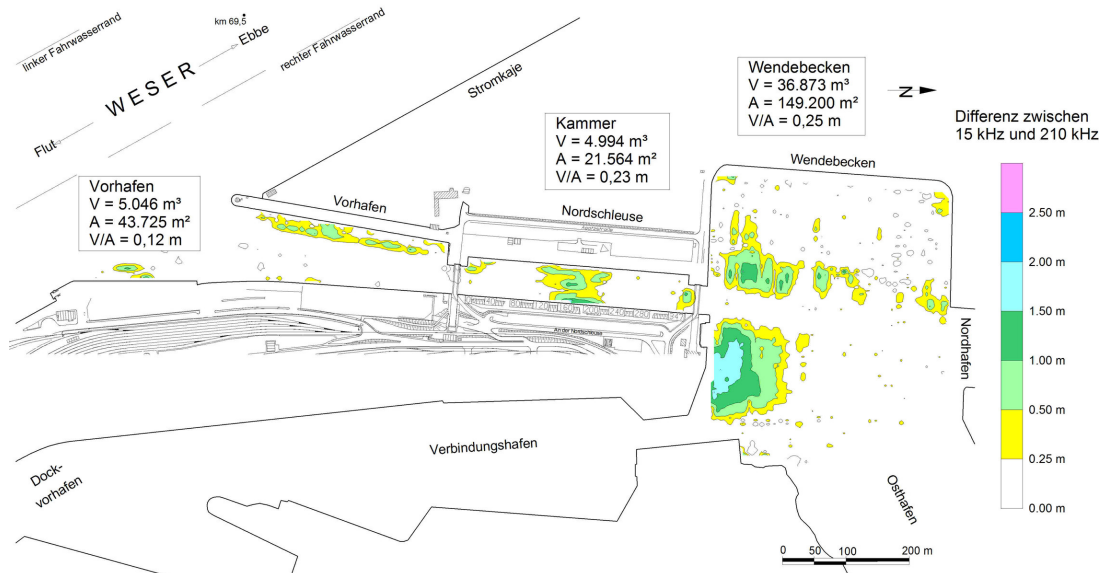


**Abb. 181: Peilung und Differenzplan im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven
vom Februar 2003**

**Peilung im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven
vom Januar 2004 (15 kHz)**



**Differenzplan im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven
zwischen dem 15 kHz- und 210 kHz-Horizont
Peilungen vom Januar 2004**



**Abb. 182: Peilung und Differenzplan im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven
vom Januar 2004**

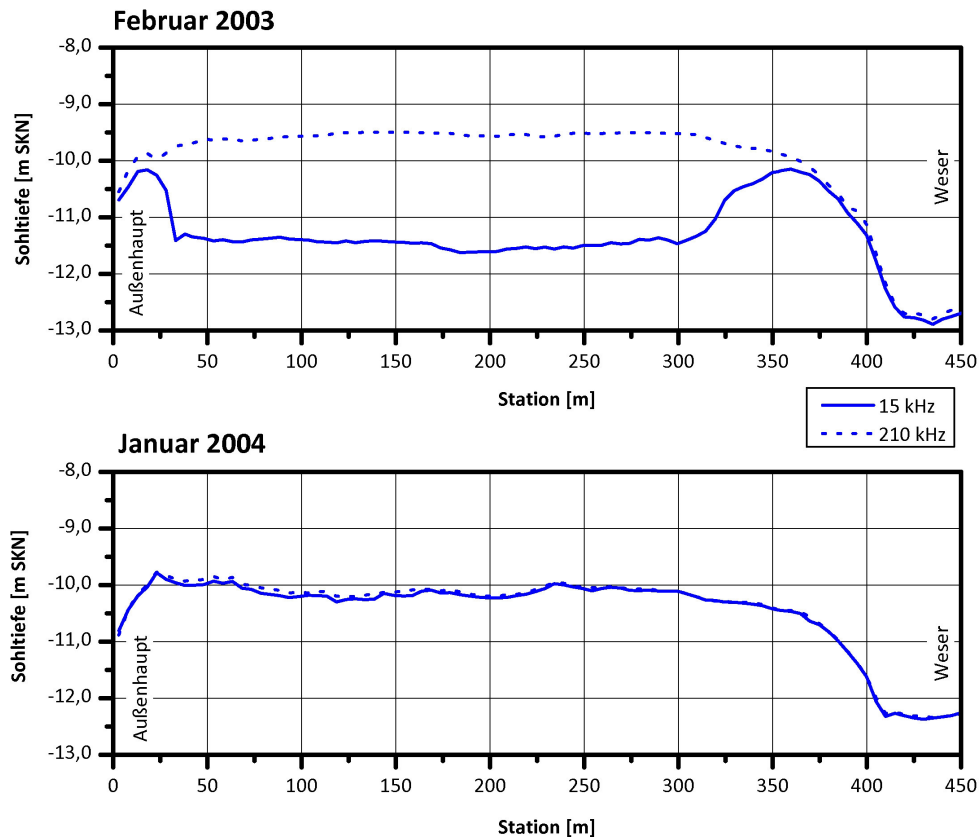


Abb. 183: Längsprofile im Vorhafen der Nordschleuse vom Februar 2003 und Januar 2004

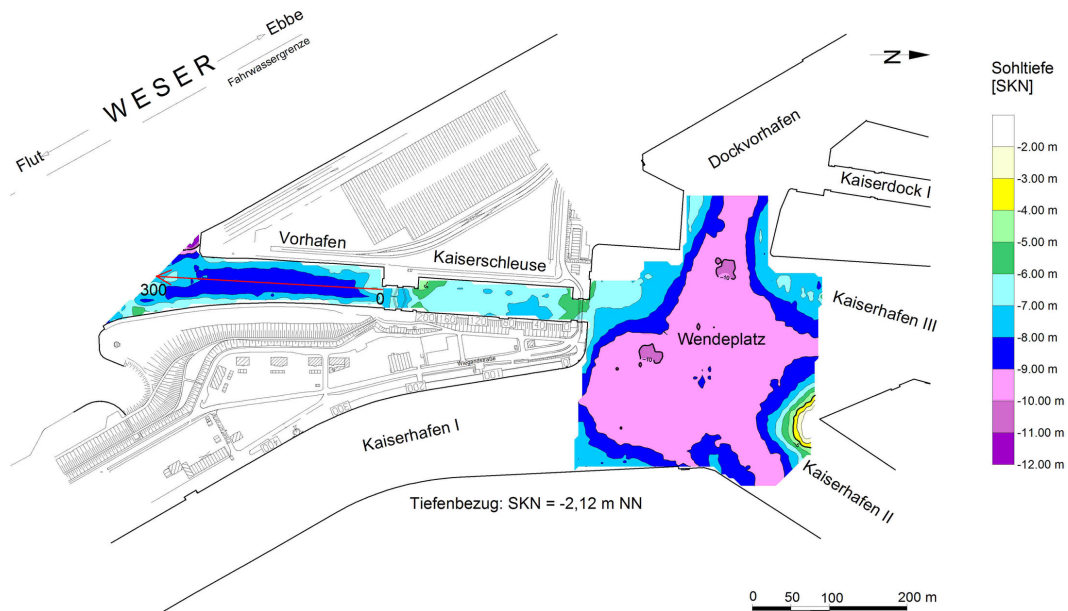
gleichzeitig verstärkt. Mit entsprechenden Gefälleverhältnissen der Vorhafensohle ist es damit möglich, in den hochgelegenen Vorhäfen die Bildung von Fluid Mud von vornherein zu unterbinden.

Im gesamten Untersuchungszeitraum von 2001 bis 2004 waren die Sohlthiefen im inneren Vorhafen der Kaiserschleuse größer als in der Einfahrt und Schleusenkommer. Wie bei der Nordschleuse bilden sich hinter der Barre in den tiefen Bereichen des Vorhafens Fluid Mud Schichten von bis zu mehreren Metern Mächtigkeit aus. Der Eintrieb von Feststoffen über die Schleusen in den Überseehafen hängt von den Gefälleverhältnissen ab. Bei der Peilung vom Mai 2002 lag die Sohle in der Kammer deutlich höher als im Vorhafen. Dementsprechend geringer war dort mit $\frac{V}{A} = 0,37$ m die Differenz der Peilhorizonte (Abb. 184).

Im Übrigen haben die Peilplananalysen ergeben, dass auch der Sedimenteintrag in den Schleusenhafen der Doppelschleuse bei höher liegender Sohle der großen Kammer und im abgeschleusten Hafen gemindert werden kann.

Der für die Peilung vom Mai 2002 in Abb. 185 aufgetragene Längsschnitt dokumentiert die größeren Differenzen zwischen dem 210 kHz und 15 kHz Horizonten im inneren Vorhafen. Im Einfahrtbereich rücken die beiden Horizonte, wie bei dem Vorhafen der Nordschleuse und in der Geesteeinfahrt näher zusammen. Das liegt an den dort auftretenden Strömungseffekten, durch die verhindert wird, dass sich die vom Tidestrom mitgeführten Schwebstoffe dauerhaft absetzen

**Peilung im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven
vom Mai 2002 (15 kHz)**



**Differenzplan im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven
zwischen dem 15 kHz- und 210 kHz-Horizont
Peilungen vom Mai 2002**

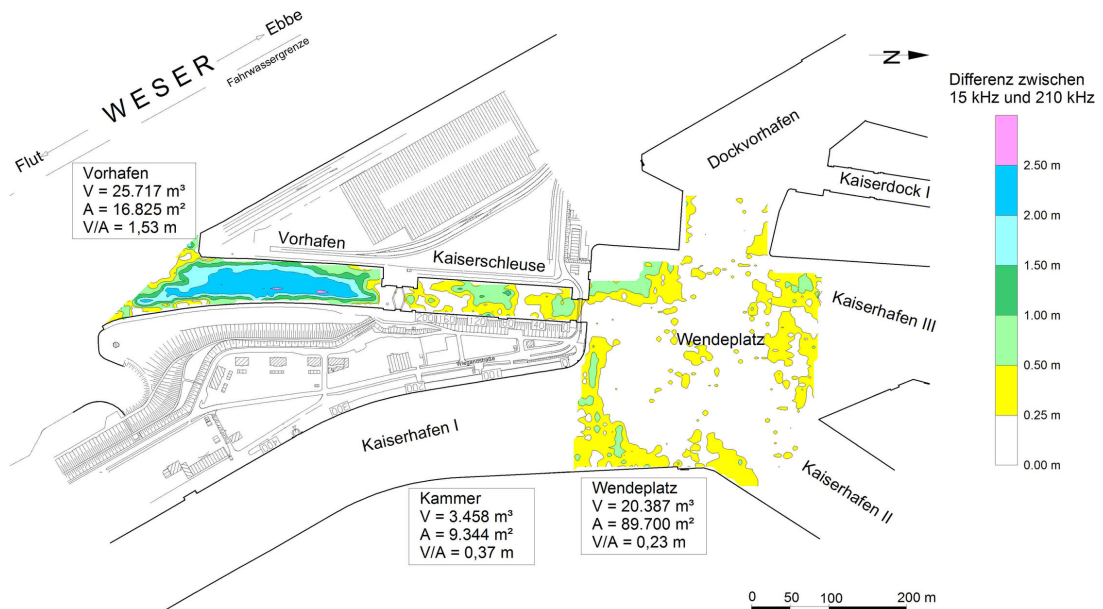


Abb. 184: Peilung und Differenzplan im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven vom Mai 2002

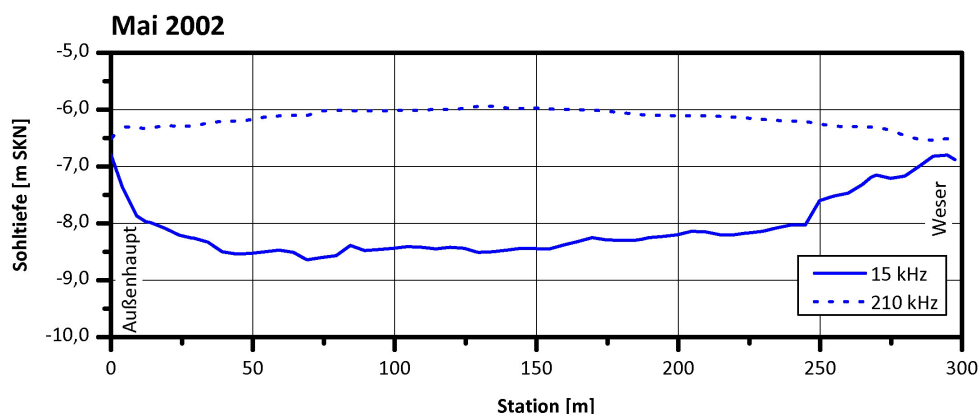


Abb. 185: Längsprofile im Vorhafen der Kaiserschleuse vom Mai 2002

oder konsolidieren können.

Bei den beiden hochliegenden Vorhäfen der Nord- und Kaiserschleuse macht es Sinn, von den Schleusenhäuptern zur Weser ein Sohlengefälle zu schaffen. Damit wird die Transportkapazität der flutstromorientierten Dichteströmungen geschwächt und der Sedimenttransport der nach außen gerichteten ebbestromorientierten Sohlströmungen verstärkt. In der Summe wird damit die Feststoffbilanz günstig beeinflusst. Folglich wird auch der Feststofftransport über die Schleusenkammern bis in den Überseehafen gemindert.

8.1.3 Emden

Für den Emdener Hafen wurden vom Januar 2004 bis zum April 2005 sechs Peilpläne analysiert. Als Beispiel ist in Abb. 186 die Peilung vom Juni 2004 dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Einfahrtsbereich zum Emdener Vor- und Außenhafen ebenfalls zur Barrenbildung neigt. Wie bei den vorstehend besprochenen Beispielen für Bremerhaven ist die Differenz der beiden Echolotsignale dort am höchsten, wo die größten niederfrequent gemessenen Sohliefen ermittelt wurden. Das gilt auch für den abgeschleusten Hafenbereich in Abb. 186. Im Mittel wurden für die einzelnen Bereiche folgende Volumen (V) und Höhendifferenzen (h) ermittelt:

Hafenbereich	Fläche $A[m^2]$	Differenzvolumen $V[m^3]$	Höhendifferenz $\frac{V}{A} = h[m]$
Außenhafen	146.600	490.264	3,36
Vorhafen	87.700	197.125	2,25
Nord-Süd kai	328.300	517.134	1,51
EVAG	305.800	167.960	0,55

Mit Abb. 186 ist nachvollziehbar, dass erhebliche Schwebstoffmengen über die Große Seeschleuse in den abgeschleusten Bereich gelangen. Im tidebeeinflussten Bereich des Vor- und Außenhafens ist das Volumen sehr stabil. Die Abweichungen betragen maximal +17% und -16% vom Mittelwert ($V \approx 700.000 \text{ m}^3$). Der Wasser- und Schwebstoffaustausch zwischen dem kürzeren Vorhafen ist mit Volumenänderungen gegenüber dem Mittelwert von $V \approx 200.000 \text{ m}^3$ rd. $\pm 30\%$ deutlich

stärker als beim Außenhafen. Dort betrugen die Abweichungen vom Mittelwert ($V \approx 500.000 \text{ m}^3$) rd. $\pm 12\%$.

Die Längsprofile für die Peilung vom Juni 2004 veranschaulichen die Schwebstoffverteilungen in den tideoffenen Hafenbecken (Abb. 187). Im flacheren, oberen Teil des Außenhafens (vgl.

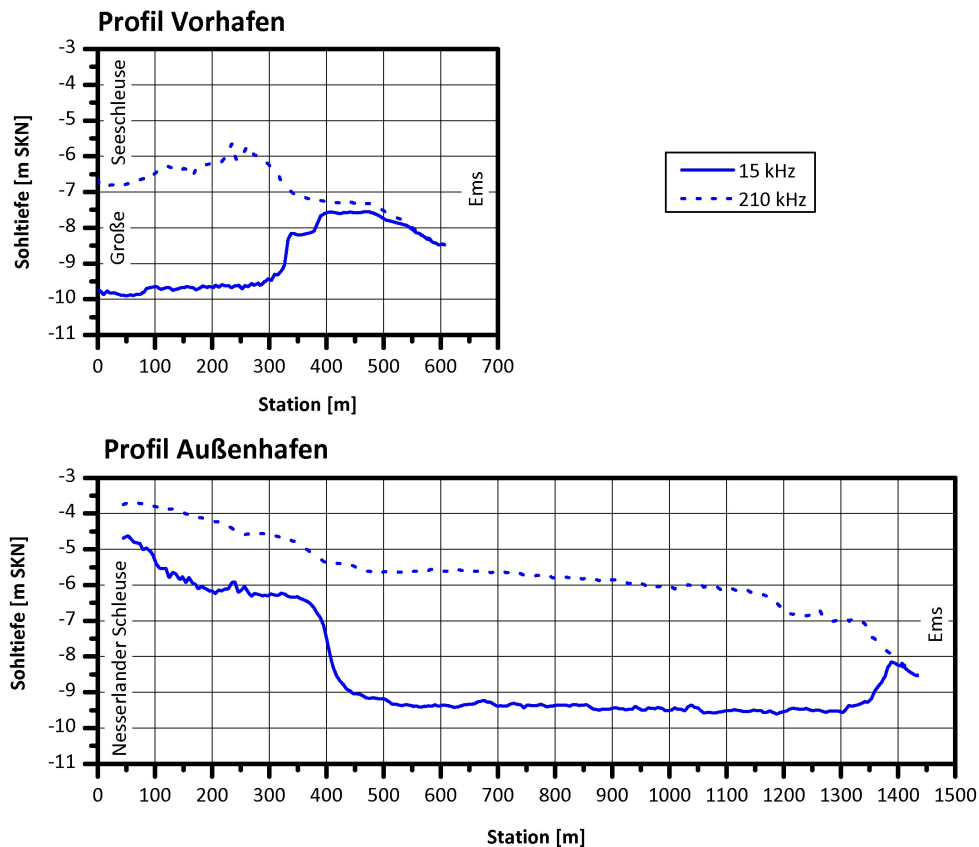


Abb. 187: Längsprofile im Vor- und Außenhafen in Emden vom Juni 2004

Abb. 186) liegt der 200 kHz-Horizont höher als im Wannenbereich zwischen Station 450 und 1300. Bemerkenswert ist die Sohlerhöhung im Einfahrtsbereich und das Zusammenrücken der Echolothorizonte. Bezeichnend ist auch der unruhige Verlauf des 210 kHz Horizonts im Vorhafen vor der großen Seeschleuse (Abb. 187). Das ist auf die in Emden entwickelte Unterhaltungsmethode zurückzuführen, bei der das verflüssigte Baggergut in die oberen Wasserschichten wieder zurückfließt.

8.1.4 Brunsbüttel

Für die Schleusenvorhäfen in Brunsbüttel standen 26 doppeltfrequente Peilungen vom Januar 2003 bis zum September 2005 zur Verfügung. Die Vorhafenflächen sowie die mittleren Differenzvolumen zwischen dem 100 kHz und 15 kHz Horizonten und mittleren Höhenunterschiede sind im folgenden zusammengestellt:

Hafenbereich	Fläche $A[m^2]$	Differenzvolumen $V[m^3]$	Höhendifferenz $\frac{V}{A} = h[m]$
Neuer Vorhafen	246.400	336.993	1,37
Alter Vorhafen	70.375	120.977	1,72

Die Abweichungen von den Durchschnittswerten betragen für den Neuen Vorhafen bis zu rd. 26% und im Alten Vorhafen bis zu 40%. Die Verhältnisse sind vergleichbar mit dem Zufahrtbereich zur Doppelschleuse in Bremerhaven und dem Vorhafen zur Seeschleuse in Emden. Besondere Bedingungen herrschen im 1400 m langen Emder Außenhafen mit Abweichungen von lediglich rd. 12%. Das liegt an den großen Vorhafenabmessungen und der relativ geringen Größe der Nesserlander Schleuse. Wie bei den hochliegenden Schleusenzufahrten in Bremerhaven ist das Differenzvolumen in Brunsbüttel bei größeren Höhendifferenzen zum Tidestrom im kleineren Alten Vorhafen geringer als im Neuen Vorhafen.

Einen Einblick in die morphologischen Verhältnisse ist beispielhaft mit Abb. 188 gegeben. Im Einfahrtbereich der Vorhäfen sind ausgeprägte Sandbarren anzutreffen. Die höchsten Differenzen zwischen den Peilfrequenzen ergeben sich für die tiefsten Punkte der Wannen in den Schleusenzufahrten. Außerhalb der Barre kommt es aufgrund der turbulenteren Strömung nicht zu den hohen Sedimentkonzentrationen wie in den beruhigten Vorhafenbereichen. Das ist auch der Grund, weshalb sich dort die verschiedenen Echolothorizonte angleichen Abb. 189.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass die Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal, in Emden und vor der Doppelschleuse in Bremerhaven stabile morphologische Verhältnisse aufweisen. In den höher gelegenen Hafenzufahrten zum Überseehafen in Bremerhaven sind die Sohlen stärkeren Veränderungen unterworfen mit stark schwankenden Volumen und Schichtstärken zwischen den Echolotsignalen. Vor allem im Vorhafen der Nordschleuse wird nach den Erkenntnissen aus dem BMBF-Vorhaben 03 KIS 019 bei der Unterhaltung mit Wasserinjektionen ein Gefälle zur Weser geschaffen. Damit ist es möglich, die Fluid Mud Bildung stark einzuschränken oder ganz zu unterbinden.

Zur Untersuchung der Eigenschaften und des Verhaltens von Flüssigschlick zwischen den Echolothorizonten ist der Vorhafen zur Doppelschleuse in Bremerhaven, die tidebeeinflussten Vorhäfen in Emden und die Zufahrten zum Nord-Ostsee-Kanal besser geeignet als die nördlichen Hafenzufahrten in Bremerhaven.

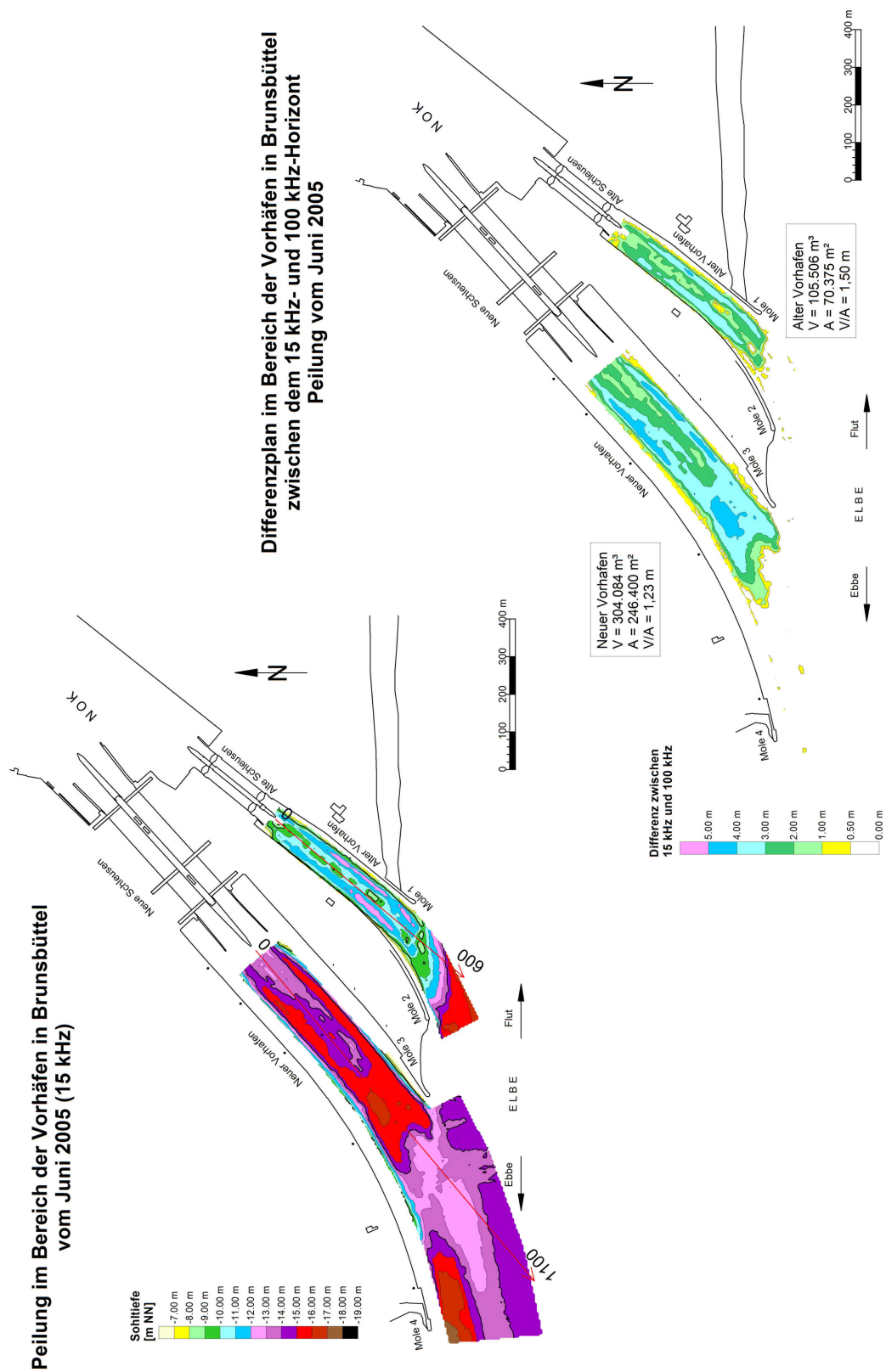


Abb. 188: Peilung und Differenzplan im Bereich Neuen und Alten Vorhafens in Brunsbüttel vom Juni 2005

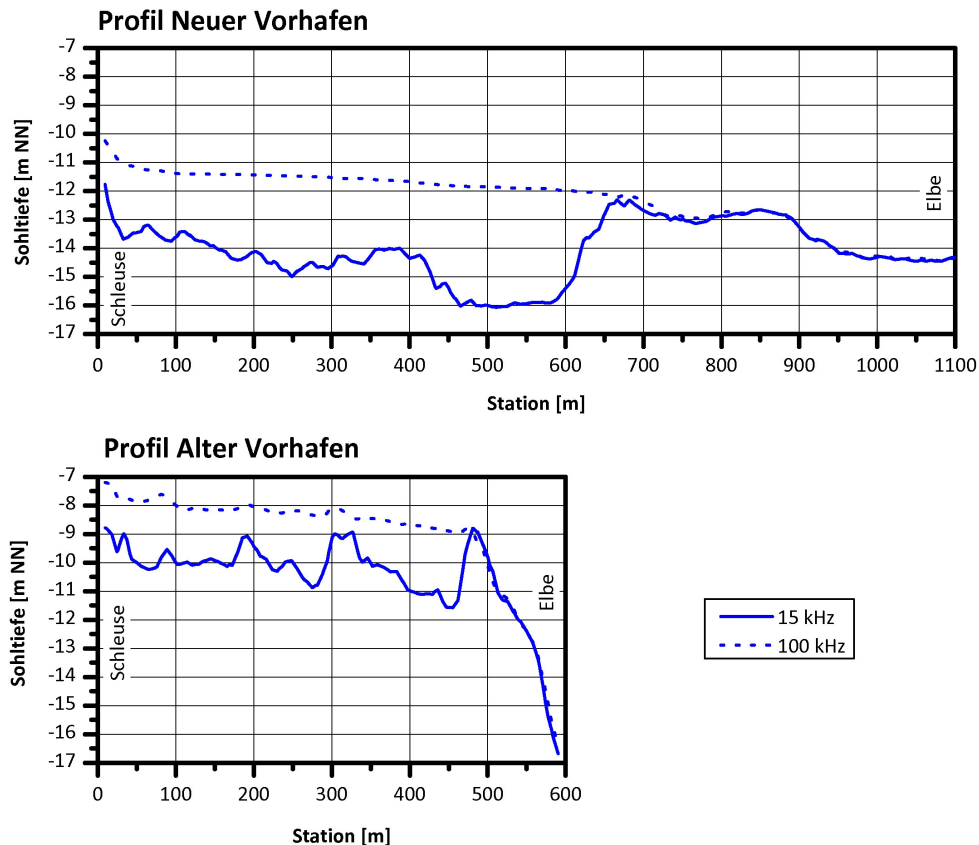


Abb. 189: Längsprofile im Alten und Neuen Vorhafen in Brunsbüttel vom Juni 2005

8.2 Bodenproben

8.2.1 Vorbemerkungen

Die an einer Flusssohle oder einem offenen Hafenbecken abgelagerten Sedimente sind eine Reaktion auf die einwirkenden hydrodynamischen und morphologischen Vorgänge. Mit der Entnahme von Bodenproben und Bestimmung der Kornverteilungen können wertvolle Aufschlüsse über das Strömungs- und Sedimentationsgeschehen gewonnen werden.

8.2.2 Bremerhaven

Die Bereiche der Nord- und Kaiserschleuse wurden bereits im Rahmen des BMBF- Vorhabens 03 KIS 019 beprobt. Bei erneuten Probenentnahmen für 03 KIS 051 wurden besonders vor der Nordschleuse weniger organisches Material und relativ hohe Feinsandanteile gefunden.

- **Nordschleuse**

Die in Abb. 190 dargestellten Körnungslinien weisen im Vorhafen (Proben 1 und 2) lediglich bis zu 40% Schlammkornanteile auf. Die organischen Anteile sind relativ gering mit bis zu 7% Glühverlusten. Die hohen Feinsandanteile und geringen Glühverluste sind ein Hinweis darauf, dass mit einem Sohlengefälle vom Außenhaupt der Schleuse zur Weser die Bildung von Flüssigschlick

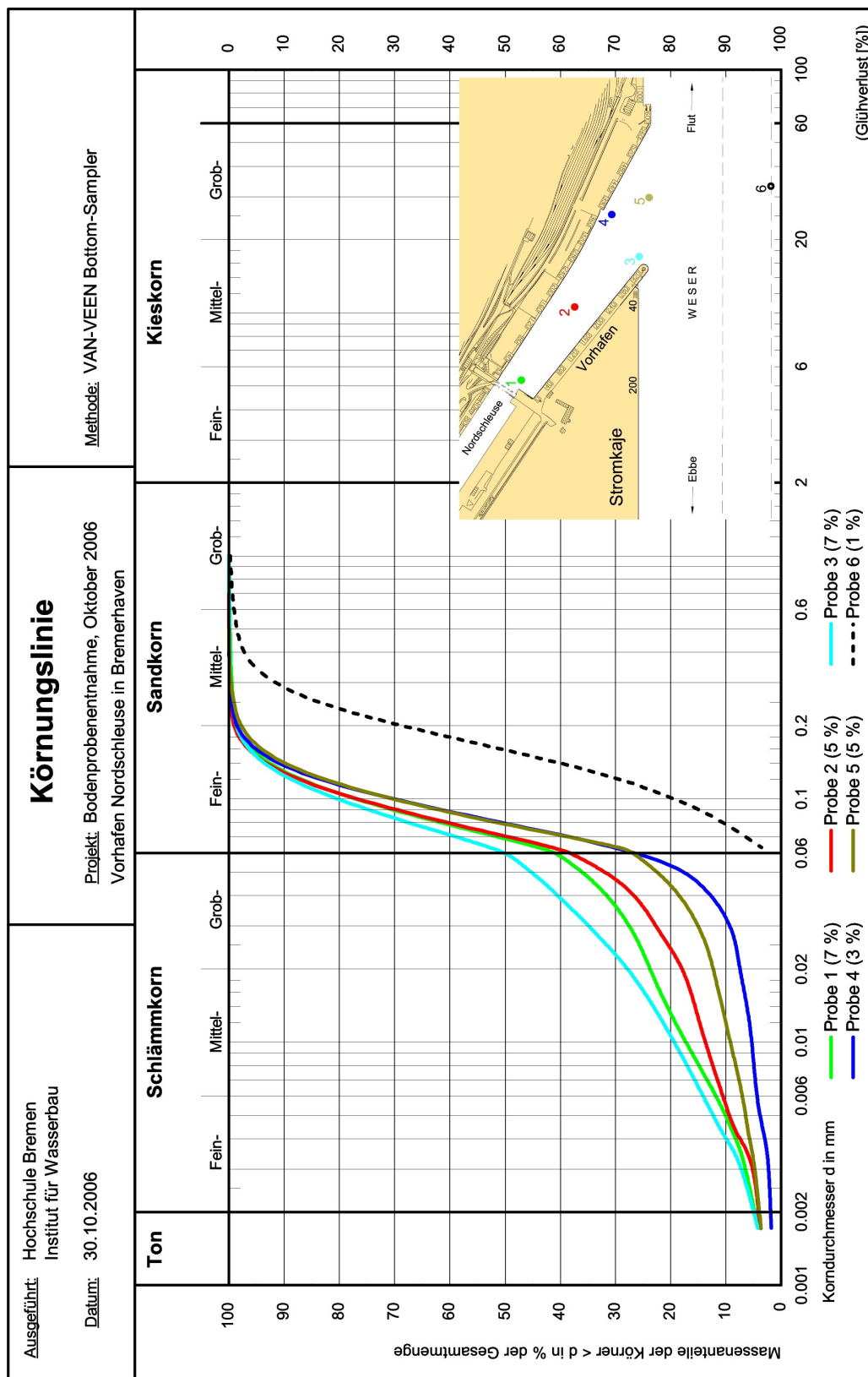


Abb. 190: Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven

eingeschränkt bzw. von vornherein verhindert wird.

Morphologisch interessant ist es, dass sich am Ablösungspunkt der Flutströmungen (Pos 3) feineres Material absetzt als im Bereich der im tiefen Wasser einlaufenden Flutstromwalze (Pos. 5) und dem Staupunkt (Pos. 4). Im Fahrwasser der Weser wurden fast ausschließlich Sandkornfraktionen mit sehr geringen organischen Anteilen ($\approx 1\%$) angetroffen.

• **Kaiserschleuse**

Das Sohlenmaterial im Fahrwasser der Weser vor der rd. einem Kilometer oberhalb der Nordschleuse gelegenen südlichen Zufahrt zum Überseehafen besteht ebenfalls aus Sandkornfraktionen mit lediglich 1% organischen Anteilen (Abb. 191). In dem höher gelegenen Vorhafen der Kaiserschleuse setzen sich jedoch merklich feinere Schwebstoffe aus der Weser ab, als vor der Nordschleuse. Die Schlämmkornanteile betrugen innerhalb des Vorhafens rd. 60% (Pos. 1 und 2). Es wurden Glühverluste bis zu rd. 10% im Labor ermittelt (Abb. 191). Relativ feines Material mit rd. 70% Schlämmkorn und 11% Glühverluste wurde im Ablösungsbereich der Flutströmungen (Pos. 3) angetroffen. Eine Reaktion auf die Flutstromwalzen sind die gröberen Kornfraktionen an den Positionen 4 und 5 in Abb. 191.

Allein die höhere Sohllage des Vorhafens der Kaiserschleuse ist ursächlich dafür, dass feineres Material aus den oberen Wasserschichten zu den Sedimentationen führt. Außerdem liegen in der angrenzenden Weser unterhalb der Columbuskaje andere morphologische und hydrodynamische Randbedingungen vor (vgl. auch Abb. 9). Es wurde mit den ADCP-Messungen gezeigt, dass die Strömungsintensitäten vor der Kaiserschleuse schwächer ausgeprägt sind. Schließlich ist noch der stärkere Schiffsbetrieb an der Nordschleuse und der wesentlich höhere Unterhaltungsaufwand in der Zufahrt zu nennen. Mit den Peilplananalysen wurde aufgezeigt, dass die Barre in der Vorhafeneinfahrt der Nordschleuse häufiger und intensiver mit Wasserinjektionen bearbeitet wird. In der Einfahrt zum Vorhafen der Kaiserschleuse wurde die Barrenbildung eher hingenommen. Für beide höher als die Wesersohle gelegenen Vorhäfen bleibt festzustellen, dass sich durch die Unterhaltung mit Wasserinjektionsmaßnahmen dort keine stabilen Flüssigschlicklagen ausbilden.

• **Doppelschleuse**

Die Geesteeinfahrt liegt im flachen Wasser außerhalb des Prallhangs der Weserkrümmung (vgl. Abb. 9). Außerdem wird die Geesteeinfahrt von der Weser durch eine stabile Barre getrennt. Dementsprechend schwach sind die im Tiderhythmus erzeugten Walzen- und Dichteströmungen im Vorhafen und der Geestemündung. In der südlichen Hafenzufahrt sind folglich deutlich feinere Sedimente als vor der Kaiserschleuse analysiert worden Abb. 192.

Bei den Proben 1 bis 4 betrugen die Schlämmkornanteile rd. 90 bis 95% mit bis zu 17% organischen Anteilen. Selbst in der Geesteeinfahrt betrugen die Feinanteile noch $\geq 80\%$ (Proben 5 und 6). Bei der äußeren Probe 7 vor der Geesteeinfahrt überwogen bereits die Sandkornanteile mit rd. 60%. Näher zum Fahrwasser wurde kiesiges Material angetroffen, welches mit dem Van-Veen-Greifer wegen zu grober Körnung nicht mehr in ausreichenden Mengen gegriffen werden konnte.

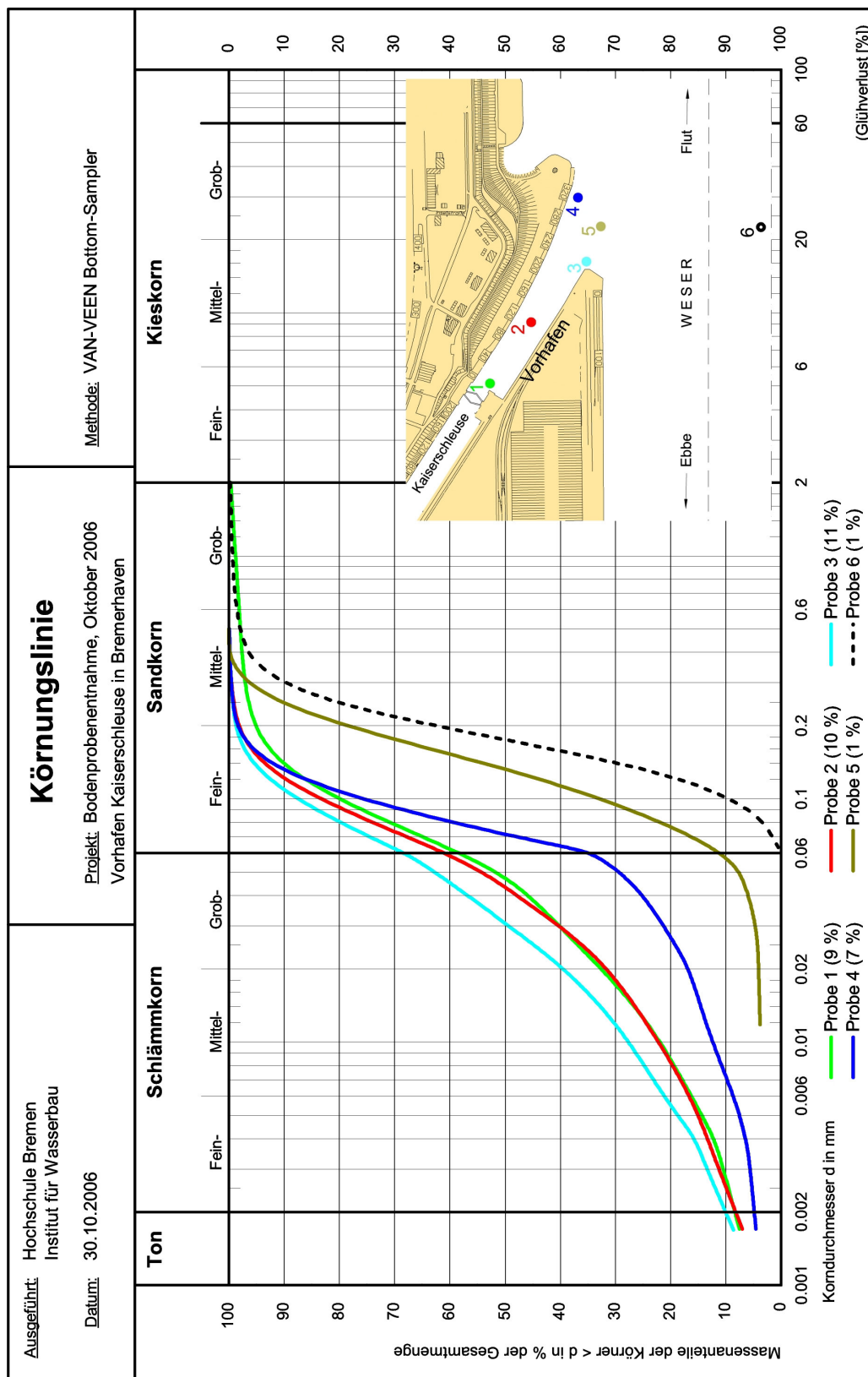


Abb. 191: Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven

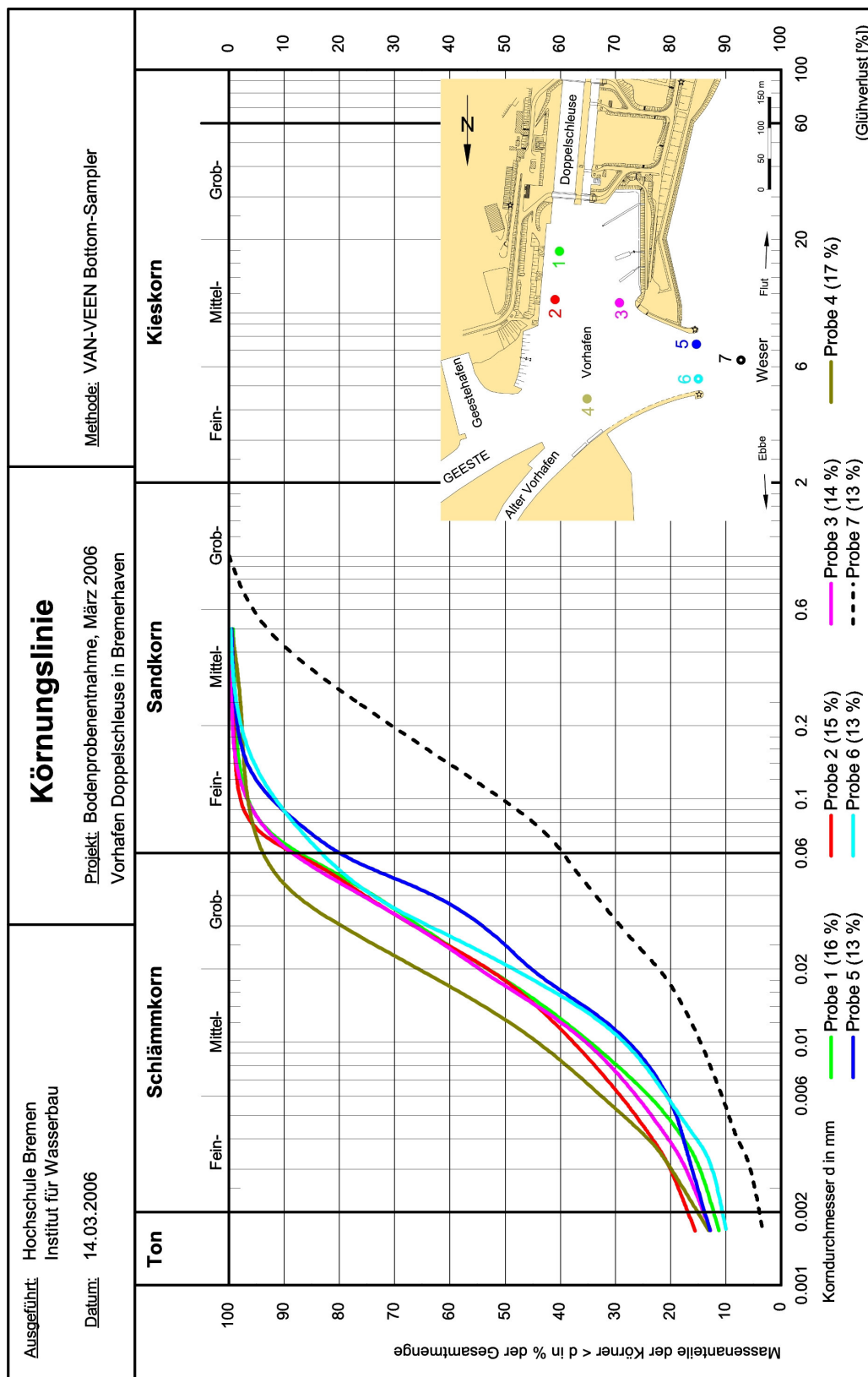


Abb. 192: Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven

Wesentlich ist die Tatsache, dass über der hochliegenden Barre nur sehr feine, stark organische Schwebstoffe in den Zufahrtsbereich zur Doppelschleuse eingetragen werden. Das Material setzt sich in den strömungsberuhigten tiefen Bereichen zwischen der Barre und den Außenhäuptern ab. Im Gegensatz zu den direkt am Strom gelegenen erhöhten Hafenzufahrten kann sich vor der Doppelschleuse im Schutz der Barre eine relativ stabile Schlicklage ausbilden.

8.2.3 Emden

Die Zusammensetzung der Sohlensedimente im Emden Vor- und Außenhafen sind mit denen von der Doppelschleuse vergleichbar (Abb. 193). Die Proben aus dem inneren Bereich des Außenhafens bestehen fast ausschließlich aus Schlämmkornanteilen mit bis zu 20% organischer Substanz (Proben 1 und 2). Auch die Proben 3 und 4 beinhalten noch weniger als 10% Feinsand bei hohen Glühverlusten.

Beachtenswert sind die Entnahmestellen im vorderen Hafenbereich in Abb. 193. Im Schutz der Westmole des Außenhafens in der Ablösezone der Flutströmungen (Pos. 5) lagert sich noch sehr feines Material ab. Ganz anders sind die Bedingungen am Kopf der Ostmole, dem Staupunkt der Flutströmungen. In dem Bereich werden im tiefen Wasser die intensiven Flustromwalzen angeregt (Pos. 6). Das erklärt den relativ hohen Fein- und Mittelsandanteil von rd. 40% der Bodenprobe. Im Fahrwasser der Ems wurde bei der Beprobung kein konsolidierter Flüssigschlick angetroffen. Das zeigt die Probenanalyse der Position 7 in Abb. 193 bei der lediglich Sandkornfraktionen und 4% organische Anteile analysiert wurden.

8.2.4 Brunsbüttel

Für den Neuen Vorhafen des Nord-Ostsee-Kanals sind die Körnungslinien der Bodenproben vom März 2006 in Abb. 194 dargestellt. Das feinste Material mit den höchsten Schlämmkornanteilen und Glühverlusten von 11 bis 14% wurde im inneren Vorhafen (Pos. 1 bis 3) angetroffen. In der Einfahrt wurden im Anströmbereich (Pos. 6) und am Staupunkt der Flutströmungen (Pos. 4) höhere Sandkornanteile und geringere organische Bestandteile analysiert als an der westlichen Mole (Pos. 5). Wie bei den Vorhäfen an der Weser und Ems besteht das Sohlenmaterial in der Elbe bei Brunsbüttel ausschließlich aus Sandkornfraktionen mit sehr geringen organischen Anteilen.

Die in Abb. 195 aufgetragenen Körnungslinien der aus dem Alten Vorhafen entnommenen Proben stimmen mit den Beprobungsergebnissen für den Neuen Vorhafen recht gut überein. Insgesamt wurde in dem höher gelegenen Alten Vorhafen feineres Material mit höheren organischen Anteilen angetroffen. Das Ergebnis ist mit dem für die Schleusenvorhäfen zum Überseehafen in Bremerhaven vergleichbar. Im inneren Vorhafen wurde das feinste Sohlenmaterial mit Glühanteilen von 10 bis 13% gefunden (Proben 1 bis 3). Im Anströmbereich der Flutströmung (Pos. 6) und am Staupunkt (Pos. 4) wurden mit 30 bis 40% höhere Feinsandanteile ermittelt als an der Mole 2 (Pos. 5). Von der Elbesohle besteht auch vor dem Alten Vorhafen ausschließlich aus Sandkornfraktionen (Pos. 7).

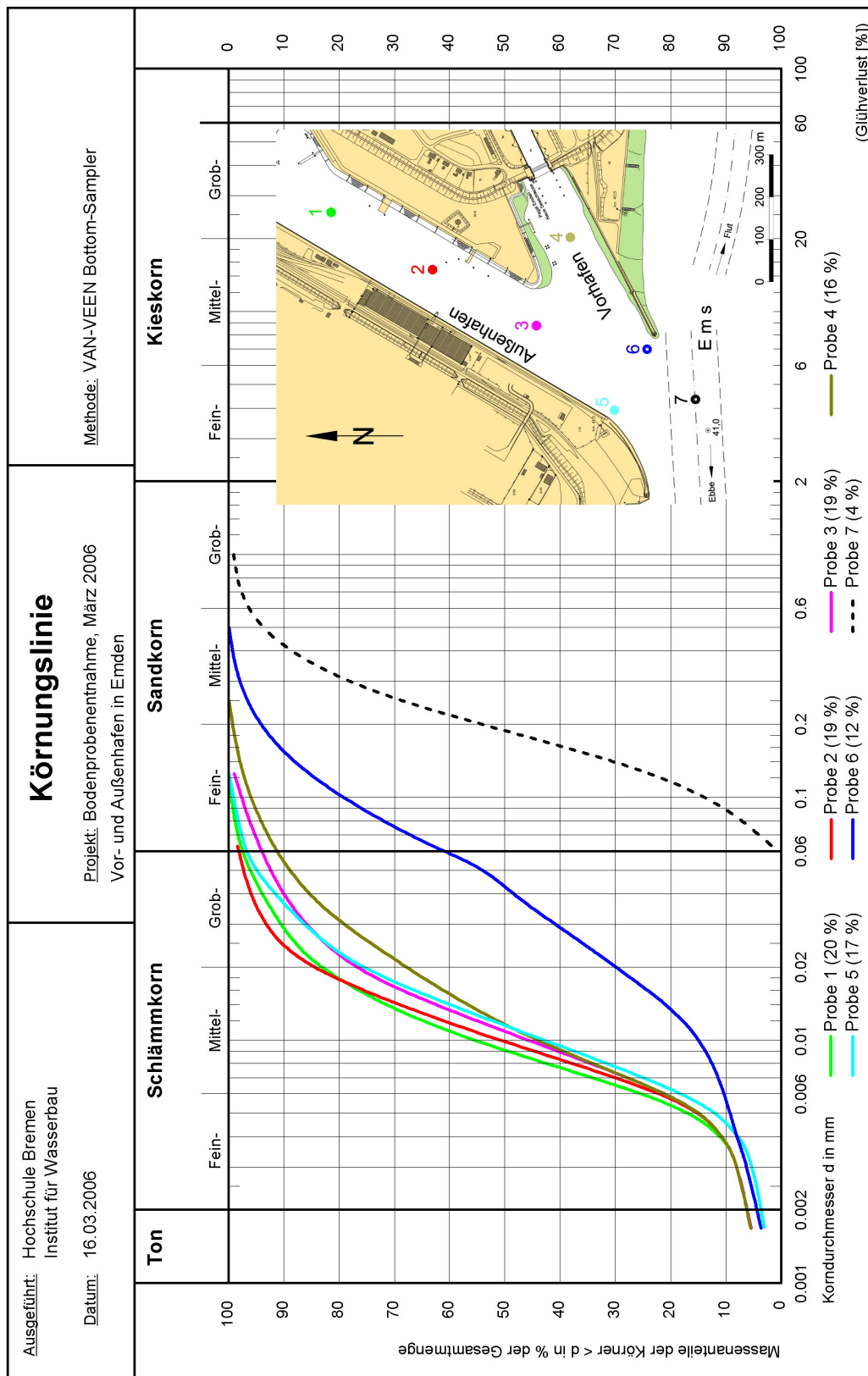


Abb. 193: Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich des Emden Vor- und Außenhafens

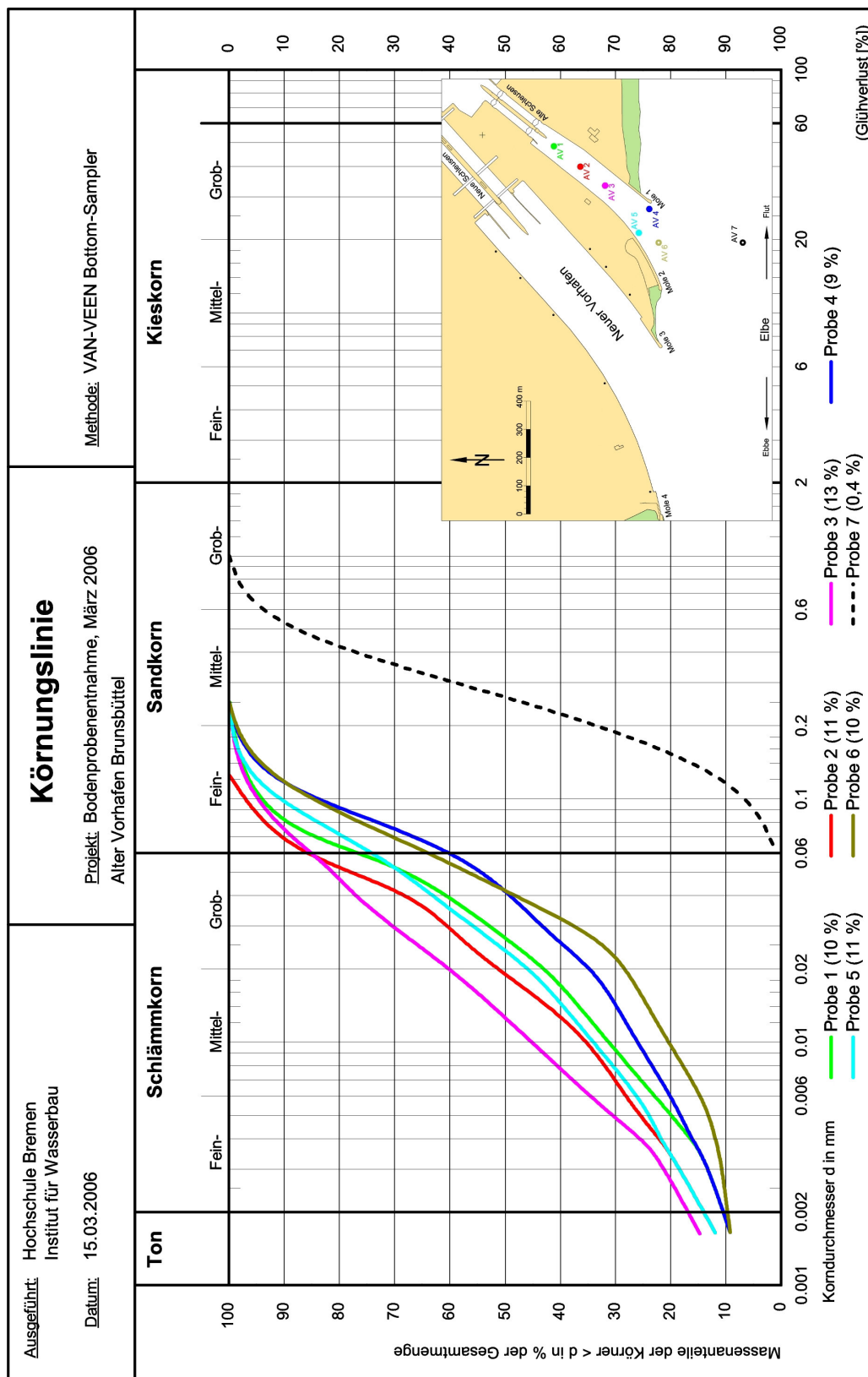


Abb. 195: Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich des Alten Vorhafens von Brunsbüttel

In den strömungsberuhigten Zonen der Brackwasserhäfen lagern sich die in den Tideflüssen im Wasserkörper mitgeführten feinen Schwebstoffe ab. Die Bodenanalysen haben ergeben, dass mit den Flutstromwalzen auch Sandkornfraktionen in die Vorhäfen eingetragen und am Staupunkt abgelagert werden. Die komplexen Strömungsbedingungen begünstigen die Bildung von Sandbarren in den Hafeneinfahrten. Die Barren und dahinter tiefer liegende Vorhafensohlen sind eine gute Voraussetzung für die Bildung stabiler Flüssigschlickschichten. Selbst in der Einfahrt zur gegenüber der Weser 7 m höher ausgebauten Zufahrt der alten Kaiserschleuse bildet sich eine stabile Sandbarre aus. Dahinter bestand die Sohle zu rd. 60% aus Schlämmkorn. Die Erkenntnisse aus früheren BMBF-Vorhaben haben dazu geführt, dass die Barre im Vorhafen zur Nordschleuse mit Wasserinjektionen abgeflacht und ein Gefälle vom Außenhaupt zur Weser geschaffen wird. Damit kann die Bildung von Fluid Mud unterbunden werden. Folglich haben die Bodenanalysen ergeben, dass an der Vorhafensohle zur Nordschleuse lediglich bis 40% Schlämmkornanteile angetroffen wurden.

8.3 Eigenschaften von Fluid Mud

8.3.1 Vorbemerkungen

Bei den Erläuterungen der Peilplananalysen wurde als Fluid Mud Menge das Differenzvolumen zwischen dem hoch- und niederfrequenten Echolotsignalen definiert. Oberhalb des hochfrequenten Echos erreichen Schwebstoffkonzentrationen Werte von bis zu $C_s \approx 1$ bis 2 g/l , die noch mit einer Trübungssonde über die Lichtdurchlässigkeit bestimmt werden können.

Mit den hochfrequenten Signalen wird ein sprunghafter Übergang (Lutokline) zu höheren Feststoffkonzentrationen angezeigt. Die Eigenschaften der hochkonzentrierten Feststoffe und ihre Veränderungen zwischen dem hoch- und niederfrequenten Horizont wurden mit Probenentnahmen vor Ort und durch Laboranalysen ermittelt. Die Glühverluste GV [%], Schwebstoffkonzentrationen C_s [g/l], dynamischen Viskositäten η [Pa·s] und Dichten ρ [t/m³] sind von den einzelnen Proben ermittelt worden. Die ab 2006 durchgeführten Beprobungen mit einer Ruttner-Flasche von 50 cm Höhe und 5 kg Gewicht wurden im Labor mehrfach kontrolliert. Im Jahre 2005 wurden die Proben mit einer Saugflasche entnommen. Kritisch sind die von einer Ultraschallsonde gleichzeitig bei einem Einsatz in Bremerhaven registrierten Werte für die Schlickdichten zu bewerten. Sie waren erheblich geringer als die für die gleichen Tiefen im Labor bestimmten Werte (SCHULT, 2007). Der sprunghafte Übergang der Sedimentkonzentrationen wird mit der Probe vom 100 kHz Horizont im Alten Vorhafen von Brunsbüttel vom 31.10.2006 dokumentiert (Abb. 196).



Abb. 196: Ruttner-Probe aus der Lutokline im Alten Vorhafen von Brunsbüttel am 31.10.2006

Die Ruttner-Proben wurden bei gleichzeitig laufendem Echolotgerät von der oberen (an der

Lutokline), mittleren und unteren Fluid Mud Schicht entnommen. Aus Abb. 197 gehen die

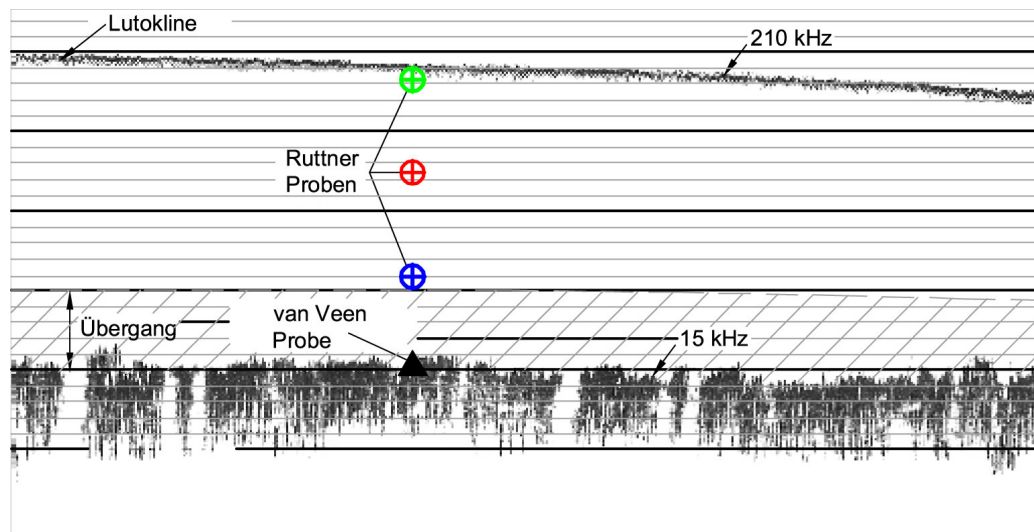


Abb. 197: Entnahmepositionen innerhalb der Fluid Mud Schicht (Peilung vom Dezember 2006 im Emdor Außenhafen)

Entnahmepositionen hervor. Die maximale Eindringtiefe der 5 kg schweren Ruttner-Flasche lag in den Häfen bei 70 bis 80% der Frequenzdifferenzen. Abgeschlossen wurden die Profile mit einer Greiferprobe. Der mit Bleiplatten beschwerte Van-Veen-Greifer hat ein Gewicht von 12,5 kg, so dass er bis zum 15 kHz Horizont eindringt.

Abb. 198 zeigt eine Greiferprobe aus dem Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven. Das



Abb. 198: Bodenprobe aus dem Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven vom 15.03.2006

festen Sohlenmaterial ist nicht mehr als schiffbar einzustufen. Im folgenden werden die Ergebnisse der Fluid Mud Untersuchungen in den Emdor Vorhäfen, Vorhafen Bremerhaven Doppelschleuse und den Vorhäfen des Nord-Ostsee-Kanals in Brunsbüttel erläutert. In den Vorhäfen der Nord-

und Kaiserschleuse sind die Fluid Mud Mengen starken Schwankungen unterworfen. Mit entsprechenden Unterhaltungsmaßnahmen –Beseitigung der Barre in der Einfahrt– kann dort die Entstehung von Flüssigschlick unterbunden werden. Außerdem hat das Sohlenmaterial der Zufahrten zu den Seeschleusen des Überseehafens in Bremerhaven höhere Sandanteile. Die Fließ- und Viskositätskurven verhalten sich dort dilatant und nicht strukturviskos.

8.3.2 Bremerhaven

Der Vorhafen zur Fischereihafenschleuse wurde insgesamt sechsmal beprobt. Bei den in Abb. 199 nach der Jahreszeit geordnet aufgetragenen Ergebnissen handelt es sich um Mittelwerte mehrerer

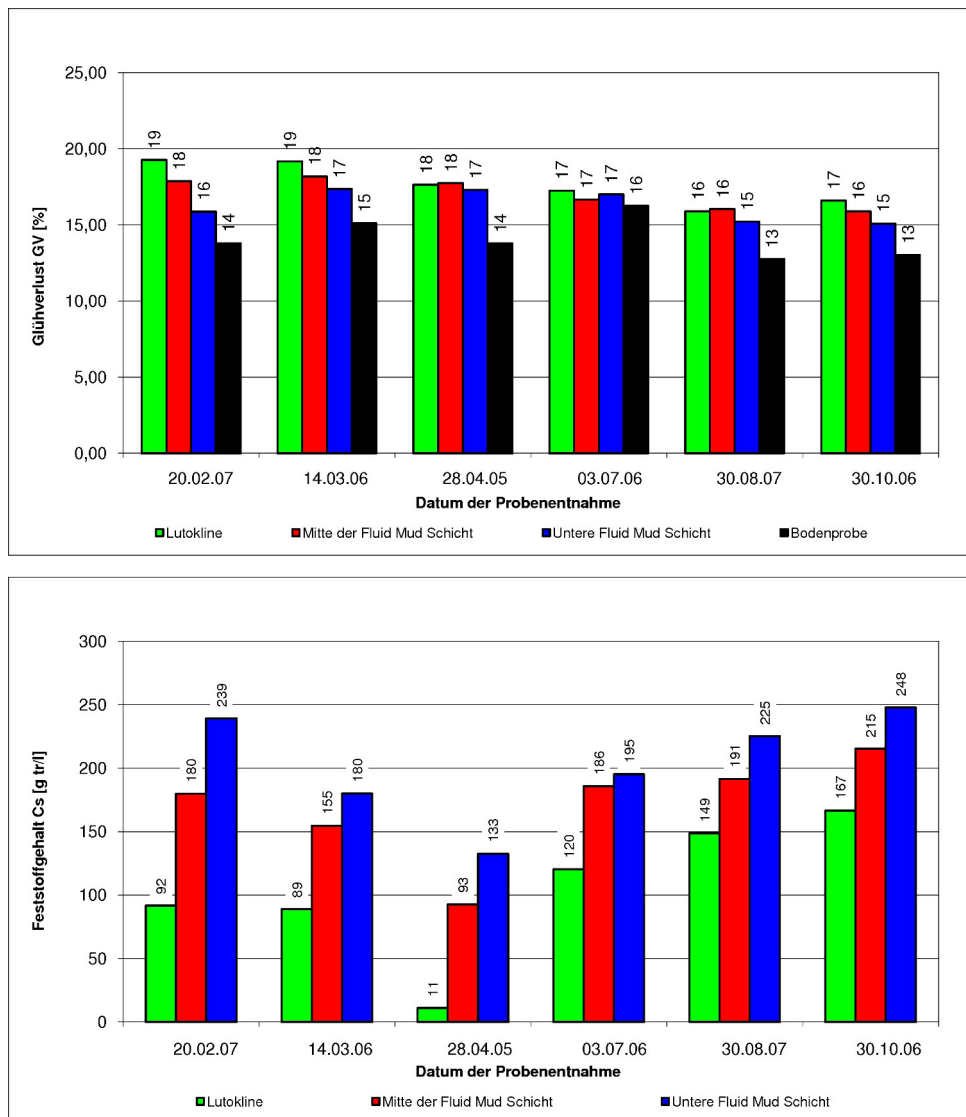


Abb. 199: Glühverluste und Feststoffgehalte im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven

Proben.

Die Proben zeichnen sich durch hohe organische, mit der Tiefe abnehmende Anteile aus. Die

geringsten Glühverluste wurden in dem verfestigten, plastischen Material der Bodenprobe angetroffen. Insgesamt ist der Trend zu erkennen, dass die organischen Anteile der Proben in der ersten Jahreshälfte größer als in den Sommer- und Herbstmonaten sind (Abb. 199, oben).

Bemerkenswert ist die mit der Tiefe starke Zunahme der Feststoffgehalte. Dazu ist anzumerken, dass vor und während der Probenentnahmen im Februar 2007 und März 2006 vor der Doppelschleuse Wasserinjektionen durchgeführt worden sind, die in den mittleren und unteren Schichten höhere Feststoffkonzentrationen verursacht haben. Bei den Werten vom April 2005 können die geringeren Konzentrationen auch auf das andere Entnahmegerät zurückgeführt werden. Ein eindeutiger Trend ist in der zweiten Jahreshälfte vom Juli bis zum Oktober auszumachen (Abb. 199, unten). Bei insgesamt abnehmenden Glühverlusten sind zunehmende Feststoffkonzentrationen zu beobachten.

Die rheologischen Untersuchungen der Schöpfer- und Bodenproben wurden im Labor des Niedersächsischen Hafenamtes Emden durchgeführt. Als Beispiel sind in Abb. 200 die mit dem Rheometer gewonnenen Ergebnisse von Proben aus dem Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven aufgetragen. Die Körnungslinien sind von den mit der Ruttnerflasche entnommenen Proben von der Lutokline (grün) bis zur größtmöglichen Eindringtiefe (blau) und von der Greiferprobe in Abb. 200 dargestellt. Die relativ hohen Feinsandanteile an der Sohle und in der unteren Ruttnerprobe können auf die zeitnah getätigte Wasserinjektionen zurückgeführt werden.

Die aus den drei Tiefen entnommenen Ruttnerproben weisen in Abb. 200 keine Fließgrenzen und nur geringe dynamische Viskositäten auf. Es handelt sich dabei noch um Flüssigkeiten mit Newton'schen Eigenschaften. Im Bereich der unteren Ruttnerprobe wird eine Übergangszone mit einem deutlich zähflüssigeren Medium erreicht. Bis zum 15 kHz Horizont nehmen die dynamischen Zähigkeiten sprunghaft zu. Mit $\eta = 2354 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ist die Viskosität um ein Vielfaches höher als bei der darüber entnommenen Ruttnerprobe mit $\eta \approx 23 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (vgl. Abb. 200).

Die aus vier Beprobungen gebildeten mittleren Zähigkeiten zeigen vom Februar zum Oktober keinen erkennbaren jahreszeitlichen Trend auf (Abb. 201, oben). Das gleiche ist für die im Labor bestimmten Dichten auszusagen (Abb. 201, unten).

Die Viskositäten betragen im Bereich des hochfrequenten Echolothorizonts $\eta < 0,5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, in der mittleren Ebene $\eta \leq 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ und in der maximalen Entnahmetiefe mit der Ruttnerflasche $\eta < 20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Ein deutlich höherer Wert wurde im März 2006 mit $\eta = 62 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ermittelt. Die Fließgrenzen der Bodenproben liegen mit $\eta = 3750 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ bis $\eta = 64110 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ um Zehnerpotenzen höher (Abb. 201, oben). Im Bereich des 15 kHz Horizonts erreichen die Bodenproben Dichten von $\rho \geq 1,2 \text{ t/m}^3$. In den Häfen vieler Länder wird die nautisch nutzbare Tiefe eines Gewässers bei einer Dichte von $\rho = 1,2 \text{ t/m}^3$ festgelegt (PIANC, 2008). Danach wäre die untere Probenebene mit der Ruttnerflasche bei $\rho = 1,1 \text{ t/m}^3$ noch als schiffbar zu bezeichnen (blaue Balken in Abb. 201, unten).

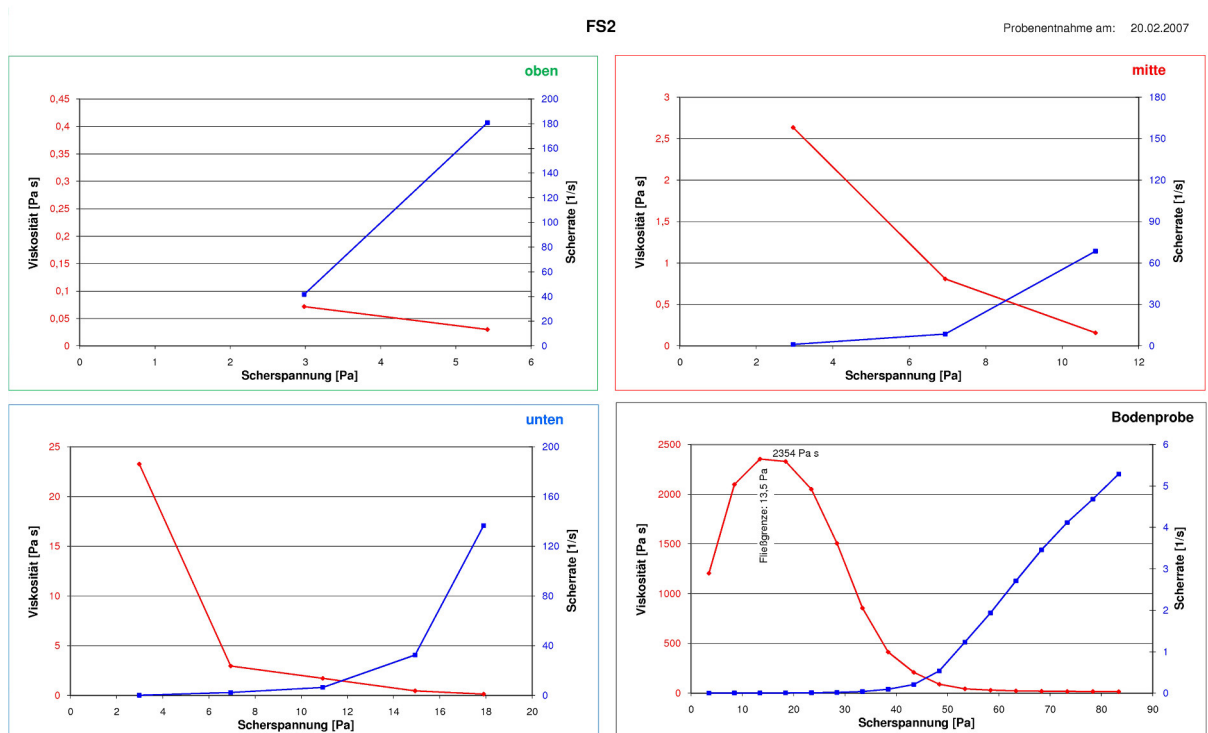
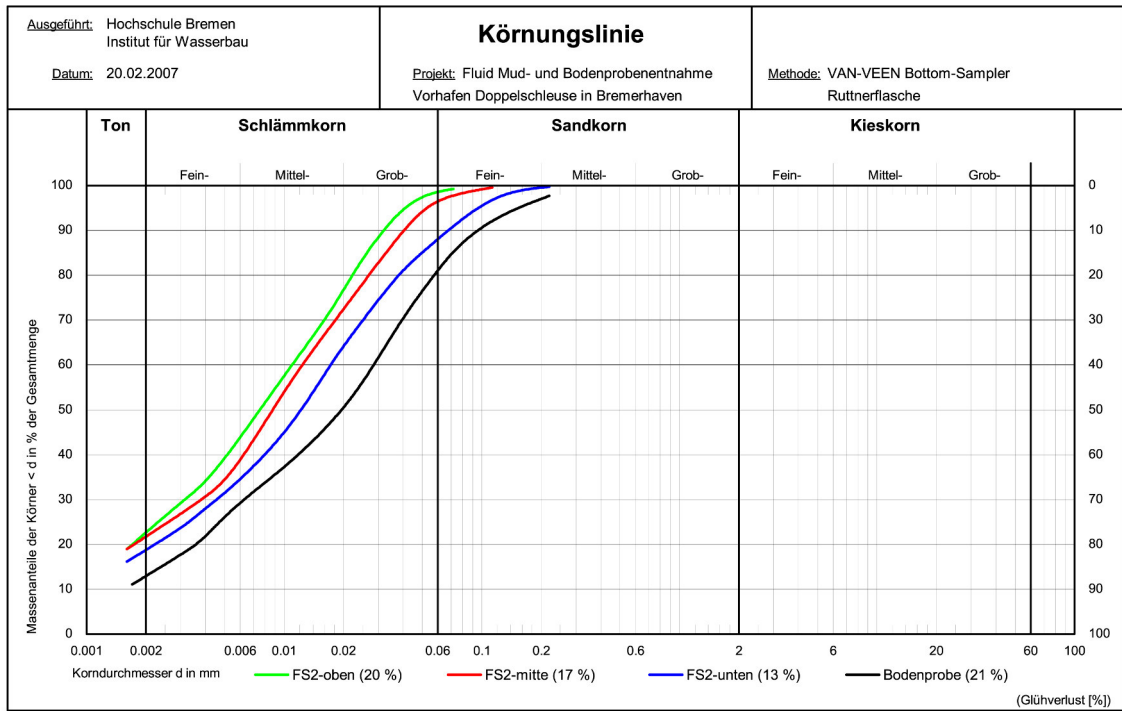


Abb. 200: Körnungslinien und Viskositäten im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven vom 20.02.2007 (Lage der Proben s. Abb. 192)

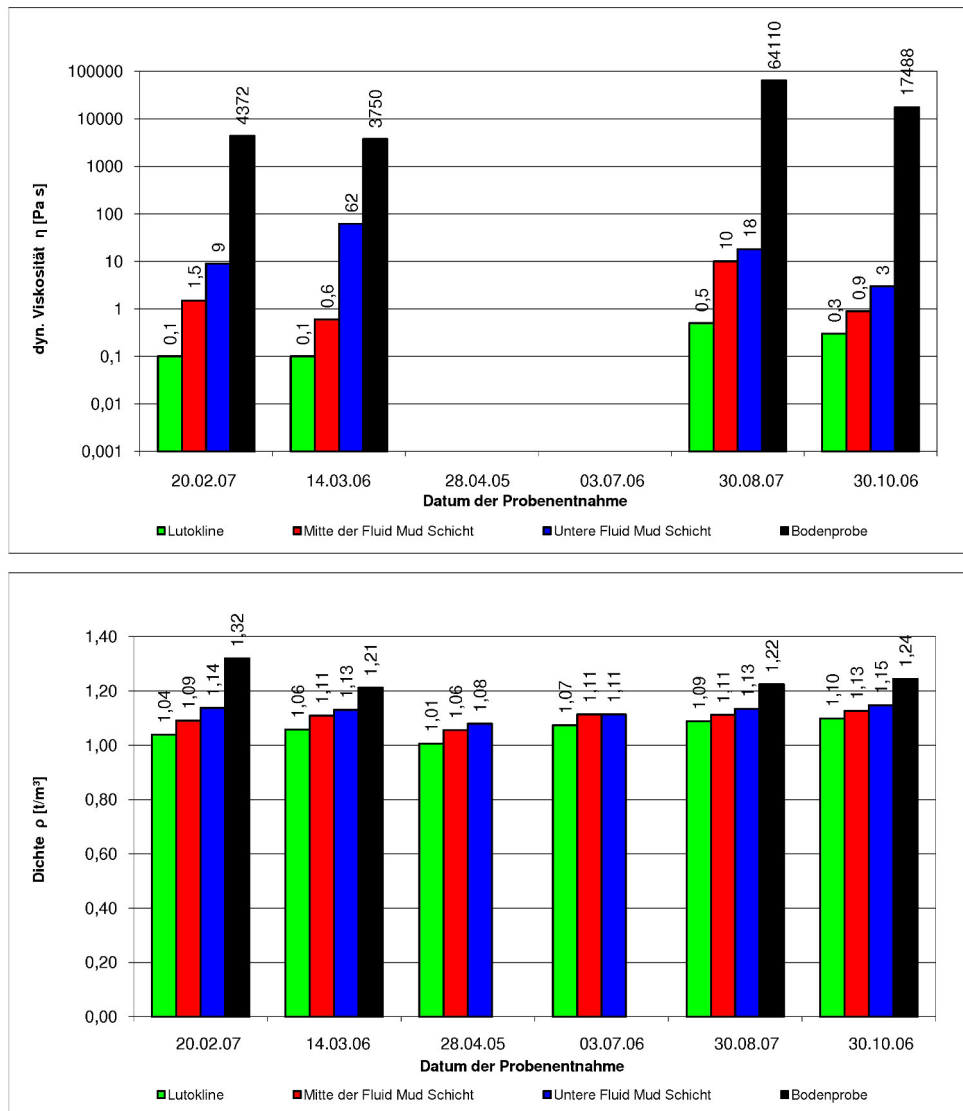


Abb. 201: Dynamische Viskositäten und Dichten im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven

8.3.3 Emden

Die aus dem Vor- und Außenhafen in Emden entnommenen Ruttnerproben weisen ebenfalls in den Frühjahrsmonaten höhere organische Anteile auf als in der zweiten Jahreshälfte (Abb. 202, oben). Insgesamt gesehen wurden im Emdener Untersuchungsgebiet höhere Glühverluste ermittelt als in Bremerhaven (vgl. Abb. 199). Das liegt an einem in Emden entwickelten Baggerverfahren (WURPTS, 2003; WURPTS und TORN, 2005). Bei der in situ Behandlung (Konditionierung) wird das Baggergut im Laderaum eines Saugbaggers durch die Luftberührung mit Sauerstoff angereichert. In Bremerhaven wird der verfestigende Schlick mit Wasserinjektionen wieder verflüssigt und dabei sauerstoffreicherer Wasser von der Oberfläche des Gewässers entnommen und der aerobe Zustand des Flüssigschlicks verbessert. Beide Verfahren werden alternativ zu konventionellen Baggermethoden seit mehr als 15 Jahren erfolgreich durchgeführt.

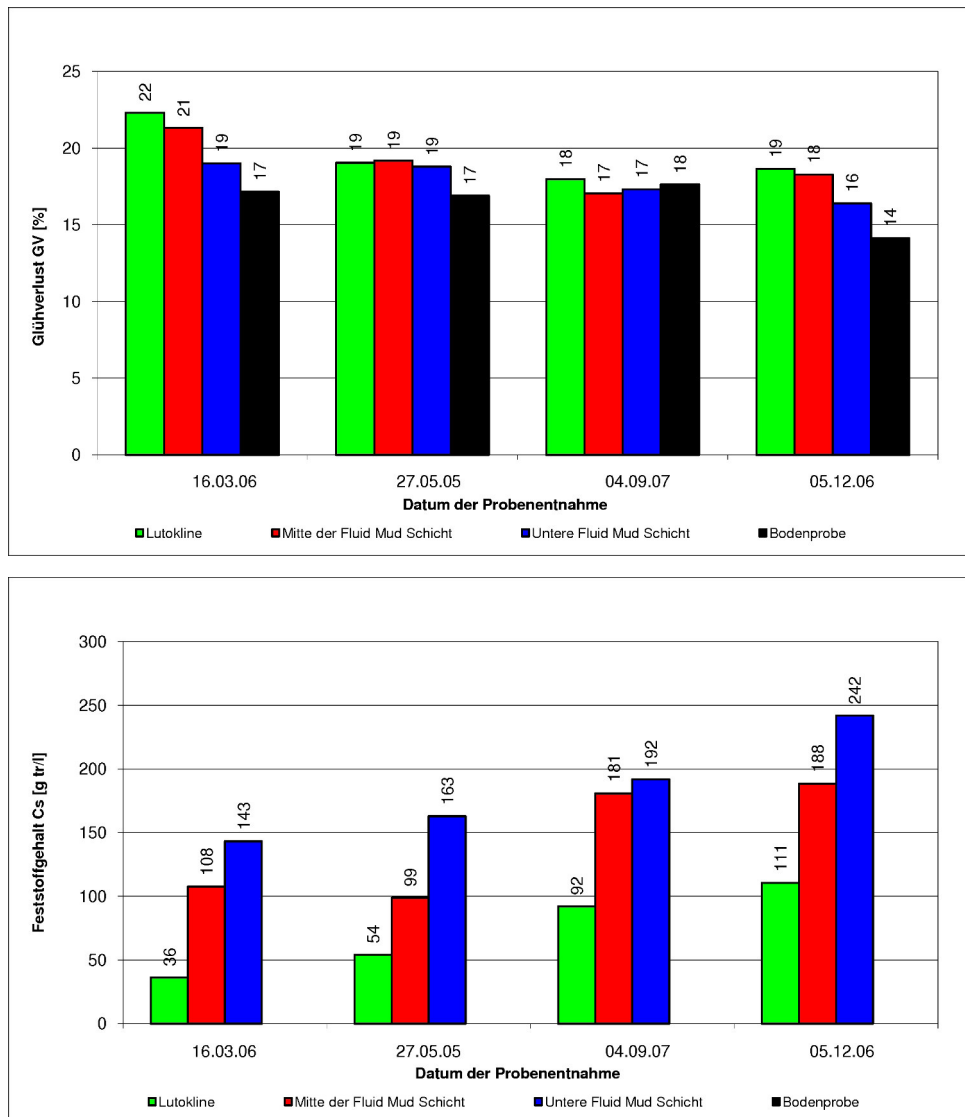
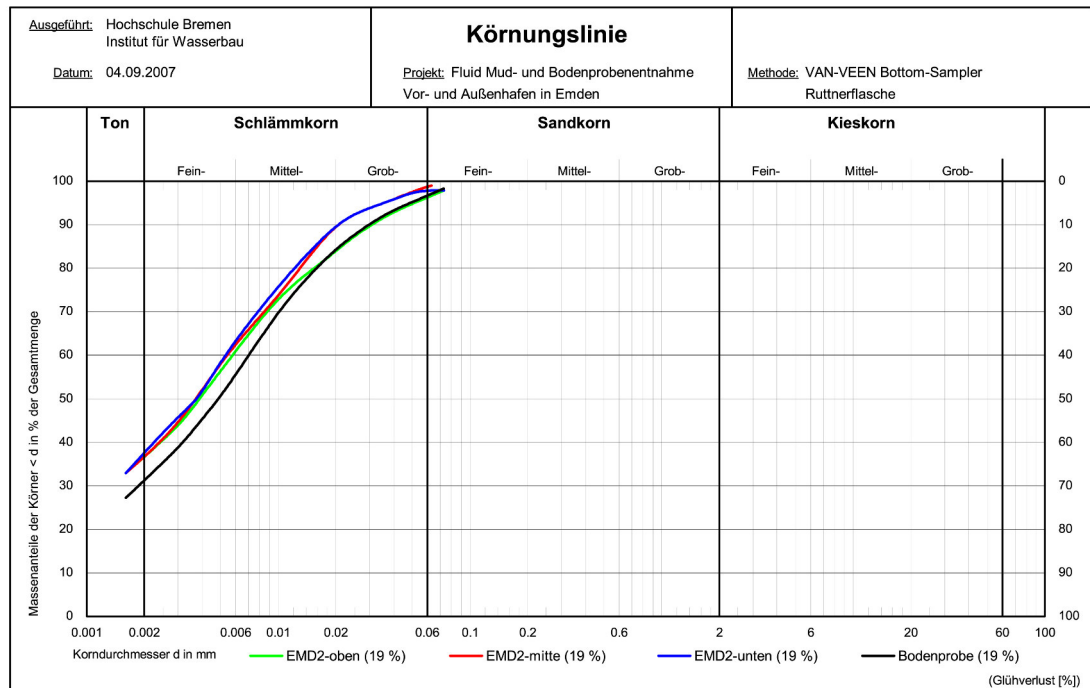


Abb. 202: Glühverluste und Feststoffgehalte im Emdor Vor- und Außenhafen

Bemerkenswert ist die Zunahme der Feststoffgehalte in den Messebenen im Jahresverlauf im Emdor Vor- und Außenhafen (Abb. 202, unten). Der Trend ist deutlicher als bei den vorstehend beschriebenen Ergebnissen für den Doppelschleusenvorhafen in Bremerhaven (s. Abb. 199). Wie angesprochen sind dort die relativ hohen Feststoffanteile auch auf zeitnah durchgeführte Wasserinjektionen zurückzuführen.

Das Ergebnis einer rheologischen Laboruntersuchung des Emdor Materials ist in Abb. 203 aufgetragen. Die Körnungslinien zeigen die sehr feinen Schwebstoffe. Auch das mit dem Bodengreifer entnommene Sohlenmaterial besteht fast ausschließlich aus Schlammkorn und feinerem Material. Bemerkenswert sind die sich schneidenden Körnungslinien. Die Grobanteile der oberen Wasser- und der Bodenprobe sind etwa gleich (Abb. 203). Das folgt aus der in Emden ausgeführten Baggermethode, bei der die gesamte Wassersäule mit dem verflüssigten Baggergut angereichert wird. Als Ergebnis kommt es zu der an den Körnungslinien erkennbaren Vermi-



EMD2

Probenentnahme am: 04.09.2007

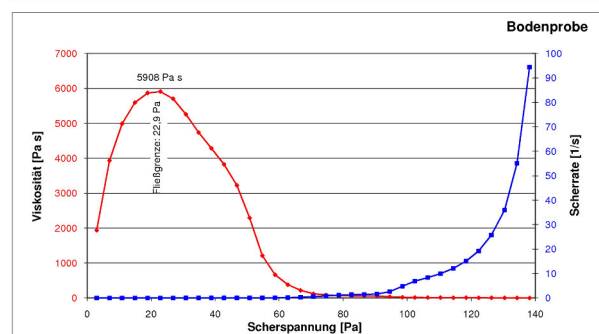
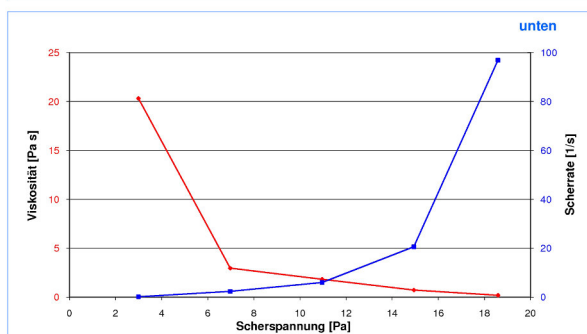
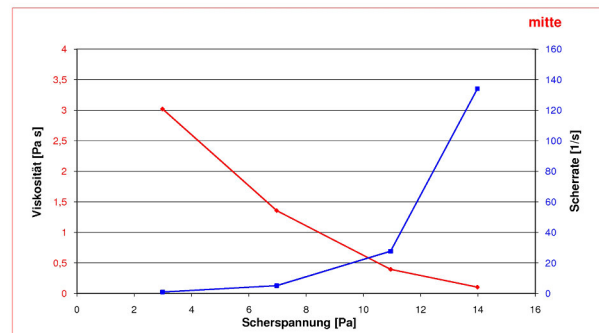
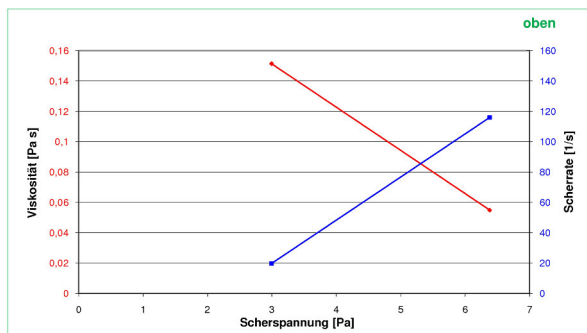


Abb. 203: Körnungslinien und Viskositäten im Vor- und Außenhafen in Emden vom 04.09.2007 (Lage der Proben s. Abb. 193)

schungen der feinen Feststoffteilchen (Abb. 203).

Die Laborergebnisse dokumentieren die innerhalb der Wassersäule zunehmenden Zähigkeiten der Flüssigkeit. Danach haben die Ruttnerproben aus der oberen und mittleren Schicht noch annähernd Newton'sche Fließeigenschaften (Abb. 203). Mit der unteren Probe beginnt mit stärker ansteigender Viskosität die Übergangszone. Die Bodenprobe lag oberhalb der Fließgrenze, die am Rheometer bei rd. 6 kPa·s erreicht wurde.

Trotz der Feinkörnigkeit des Emder Sohlenmaterials ist es nicht homogen, so dass die im Labor bestimmten dynamischen Viskositäten entsprechende Schwankungen ergeben. In Abb. 204 sind deshalb die Mittelwerte verschiedener Beprobungen aufgetragen. Die Viskositäten der Flüs-

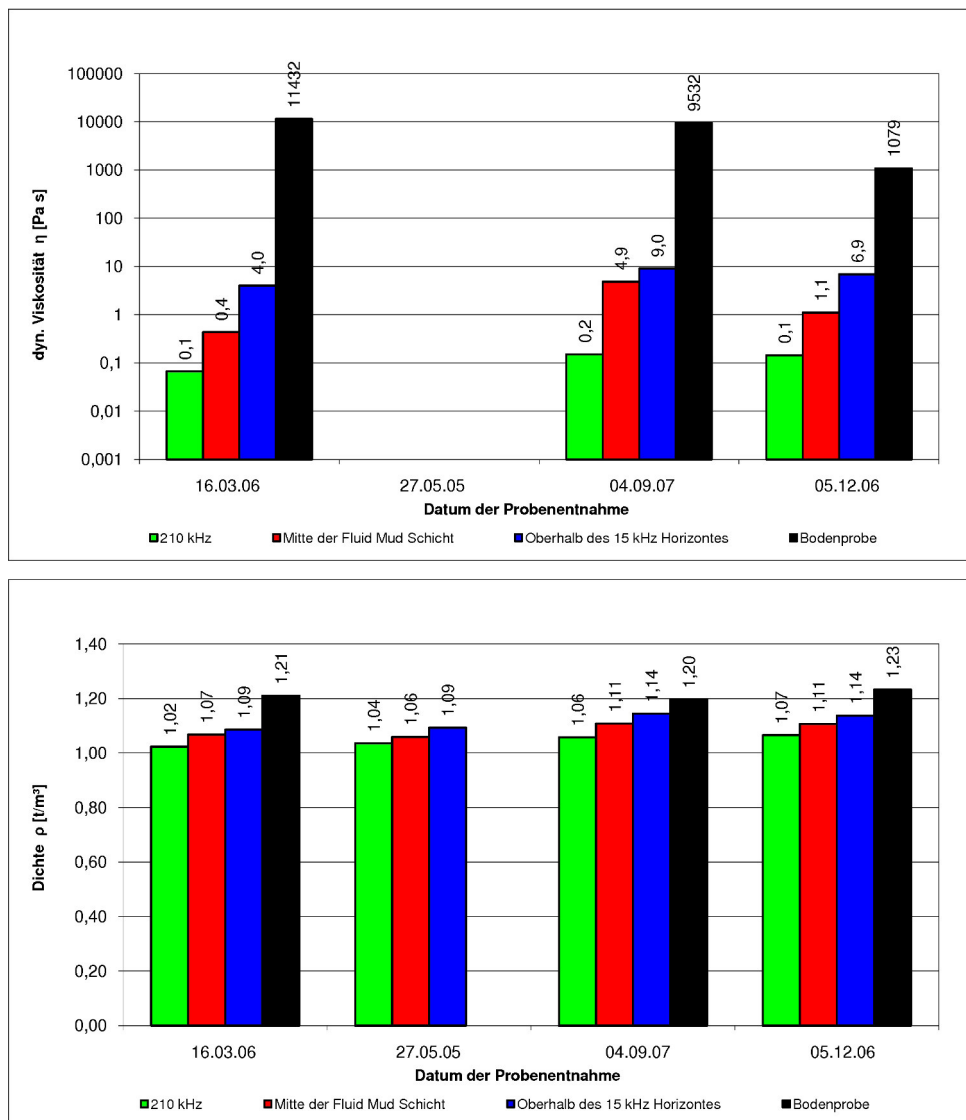


Abb. 204: Dynamische Viskositäten und Dichten im Emdor Vor- und Außenhafen

sigproben mit der Ruttnerflasche weisen im September und Dezember insgesamt etwas höhere Werte auf als im März. Auch die Dichten sind in der zweiten Jahreshälfte etwas höher ($\rho \leq 1,14 \text{ t/m}^3$) als im ersten Halbjahr ($\rho \leq 1,09 \text{ t/m}^3$). Sowohl die dynamischen Viskositä-

ten mit $\eta < 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ als auch die Dichten der Flaschenproben können als schiffbar eingestuft werden. Das gilt jedoch nicht mehr für die Bodenproben, für die Dichten von $\rho \geq 1,2 \text{ t/m}^3$ und Zähigkeiten im Kilopascalbereich bestimmt wurden (1100 bis 11400 $\text{Pa} \cdot \text{s}$). Oberhalb der Fließgrenze ist die Zähigkeit des verfestigten Schlicks mit $\eta \geq 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ um sechs bis sieben Zehnerpotenzen höher als die von reinem Wasser ($\eta = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$).

8.3.4 Brunsbüttel

Die natürlichen Sedimentationsvorgänge werden in den Vorhäfen des Nord-Ostsee-Kanals im Vergleich zu den Untersuchungsgebieten an der Weser und Ems sehr viel stärker durch betriebliche Vorgänge beeinflusst. Besondere Auswirkungen hat der sehr starke Schiffsverkehr durch den Seekanal. Außerdem ist anzumerken, dass bei Bedarf erhebliche Wassermengen aus dem Kanal durch den Alten Vorhafen zur Elbe abgegeben werden. Die erforderlichen Unterhaltungsmaßnahmen werden konventionell mit einem Laderaumsaugbagger durchgeführt. Das Baggergut wird einige Kilometer unterhalb in der Elbe umgelagert.

• Neuer Vorhafen Brunsbüttel

Die in Abb. 205 über das Kalenderjahr verteilten Glühverluste sind insgesamt etwas geringer als in den vorstehend beschriebenen Revieren an der Ems und Weser. Mit den Ruttnerproben wurde auch für den Neuen Vorhafen festgestellt, dass die Feinstoffe zum Frühjahr mehr organische Bestandteile haben als im Juli und September (Abb. 205). Die Beprobung von Ende Oktober 2006 fällt etwas aus dem Rahmen. Es ist denkbar, dass vorher organisch weniger aktives Material durch Baggerungen aus dem Vorhafen entfernt und Schwebstoffe mit höheren organischen Anteilen neu eingetragen wurden.

Mit Abb. 205 wird der an den anderen Tideflüssen beobachtete Trend bestätigt, dass die Feststoffgehalte in den verschiedenen Ebenen unterhalb des hochfrequenten Echolotsignals im Verlauf des Kalenderjahres ansteigen. Die kleine Unstimmigkeit bei der oberen Wasserprobe vom Mai 2005 ist auf die andere Entnahmемethode (Saug- anstatt Ruttnerflasche) zurückzuführen.

Die in Abb. 206 eingetragenen Körnungslinien und dynamischen Viskositäten dokumentieren die Ergebnisse von Laboruntersuchungen für Beprobungen des Neuen Vorhafens im September 2007. Im Vergleich zu den Ruttnerproben weist die Entnahme mit dem Bodengreifer etwas gröberes Schlämmkorn mit rd. 10% Feinsandanteilen auf. Mit dem Rheometer wurden für die oberen Entnahmen noch sehr geringe Viskositäten bestimmt, die die guten Fließeigenschaften der Wasserproben bestätigen. Auch die Probe aus der unteren Wasserschicht war noch deutlich von einer Fließgrenze entfernt. Bei der Bodenprobe hatte die der Fließgrenze zuzuordnende Zähigkeit mit 37 kPa·s einen sehr hohen Wert.

Auch für den Neuen Vorhafen in Brunsbüttel weisen selbst die gemittelten dynamischen Viskositäten der Beprobungen starke Abweichungen aus (Abb. 207). Das gilt vor allem für die Entnahmen mit den Bodengreifer. Die Streuungen sind mit der inhomogenen Bodenzusammensetzung zu erklären und damit, dass mit dem Rheometer nur geringe Mengen (im Milliliterbereich) untersucht werden.

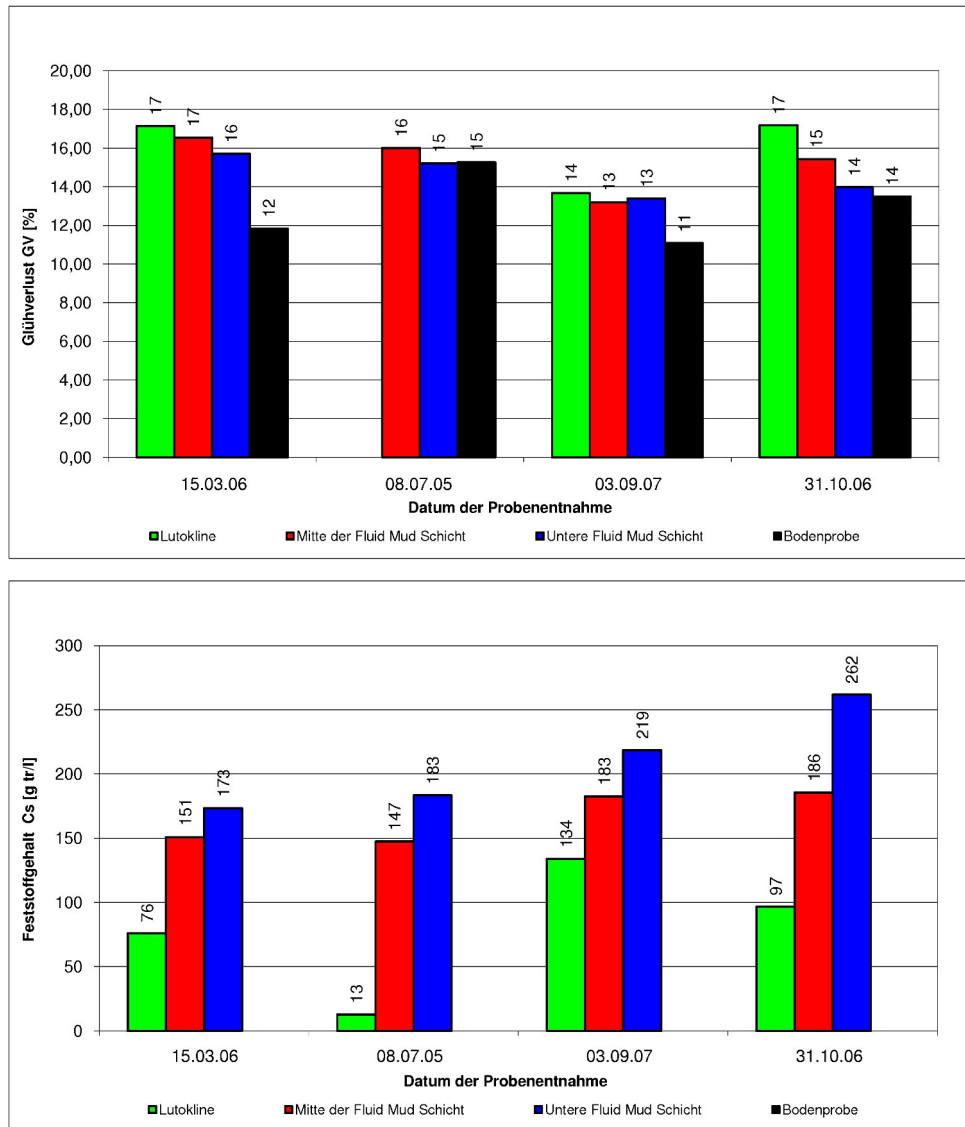


Abb. 205: Glühverluste und Feststoffgehalte im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel

Erkennbar ist in Abb. 207 wie die Viskositäten der Ruttnerproben mit der Tiefe (grüne bis blaue Balken) langsam zunehmen. Auch in der unteren Wasserschicht wurden im Neuen Vorhafen lediglich Zähigkeiten zwischen 0,7 und 9,9 $Pa \cdot s$ festgestellt. Die für die Bodenproben an den Fließgrenzen ermittelten Werte sind erheblich höher. Sie streuen aber beträchtlich, wie aus Abb. 207 zu ersehen ist. Das Ergebnis vom März 2006 ist dennoch als „Ausreißer“ zu betrachten, obwohl der geringere Wert für die Bodenprobe mit $\eta = 346 Pa \cdot s$ etwa 500 mal so hoch ist wie der der unteren Flüssigprobenentnahme von $\eta = 0,73 Pa \cdot s$.

Die eingetragenen Dichten in Abb. 207 weisen für die Bodenproben Werte von $\rho \approx 1,2$ bis $1,3 t/m^3$ aus, die in Übereinstimmung mit dem Schrifttum als nicht mehr schiffbar einzustufen sind. Alle Ruttner Proben liegen deutlich unter diesen Werten.

• Alter Vorhafen Brunsbüttel

Die Glühverluste für den Alten Vorhafen dokumentieren in Abb. 208 (oben), wie bei allen ande-

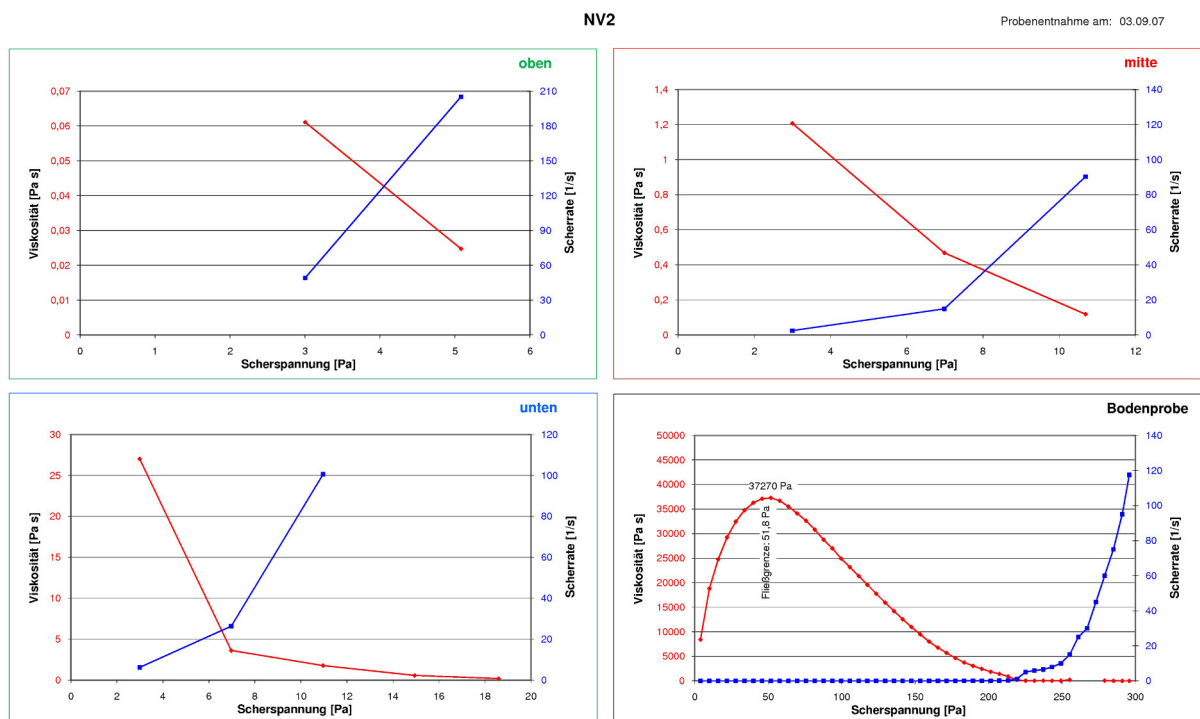
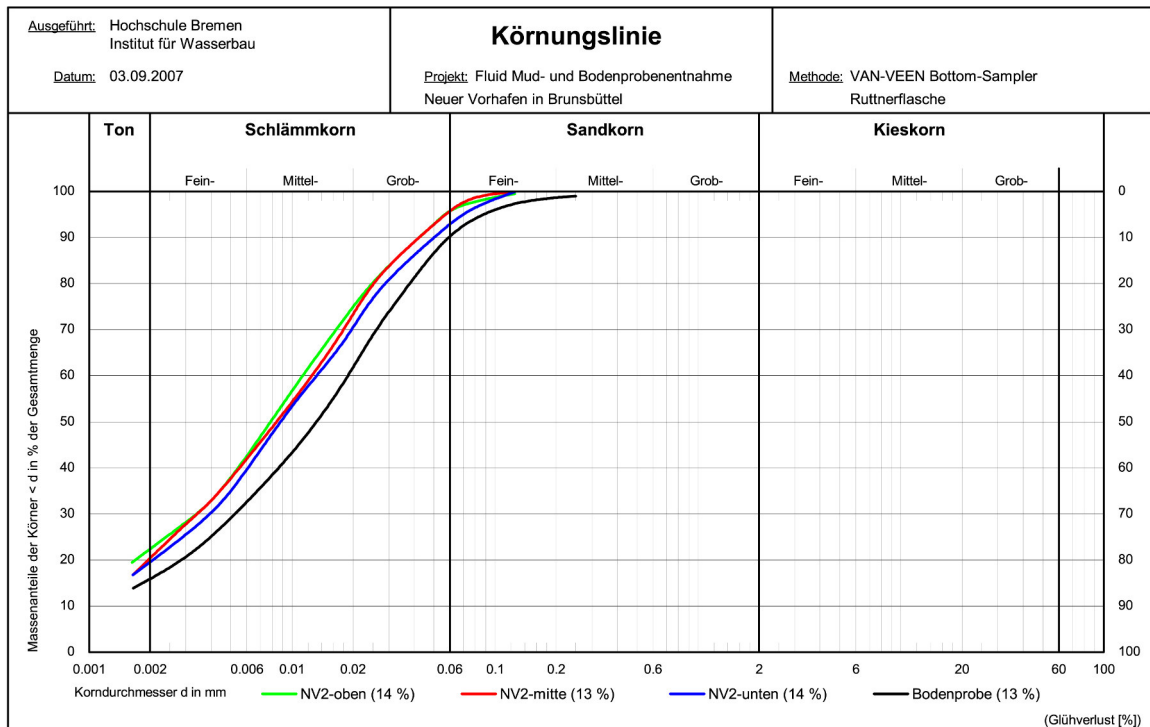


Abb. 206: Körnungslinien und Viskositäten im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel vom 03.09.2007 (Lage der Proben s. Abb. 194)

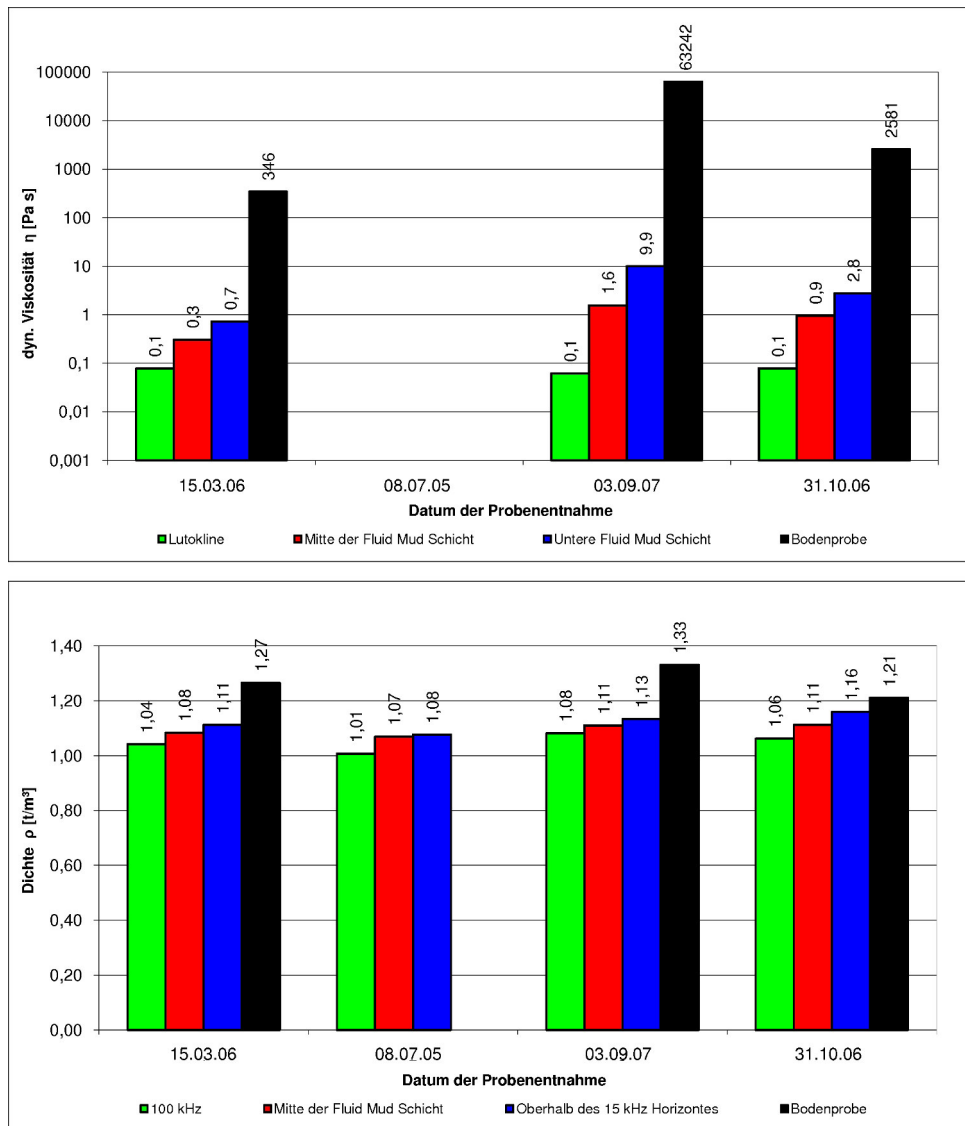


Abb. 207: Dynamische Viskositäten und Dichten im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel

ren Untersuchungsgebieten, wie die organischen Anteile der Feststoffe von dem hochfrequenten Echo (grün) bis zur Sohle (schwarz) abnehmen. Vom März bis zum September zeigt sich bei den Ruttnerproben ebenfalls die abnehmende Tendenz der Glühverluste. Wie im Neuen Vorhafen wurden im Oktober 2006 höhere Werte gemessen als im September 2007. Bei den zugehörigen Feststoffgehalten ist es umgekehrt (Abb. 208, unten). Die geringeren Mengen im Juli 2005 sind auf die andere Entnahmeart zurückzuführen.

Die Körnungslinien der Ruttnerproben in Abb. 209 stimmen mit denen im Neuen Vorhafen annähernd überein (vgl. Abb. 206). Das ist selbstverständlich, da es sich in beiden Fällen um Schwebstoffe handelt, die von der Elbe in die benachbarten Vorhäfen transportiert wurden, sich dort absetzen und langsam verfestigen. Deshalb ähneln sich auch die Körnungslinien der Bodenprobe (vgl. Abb. 209 und Abb. 206).

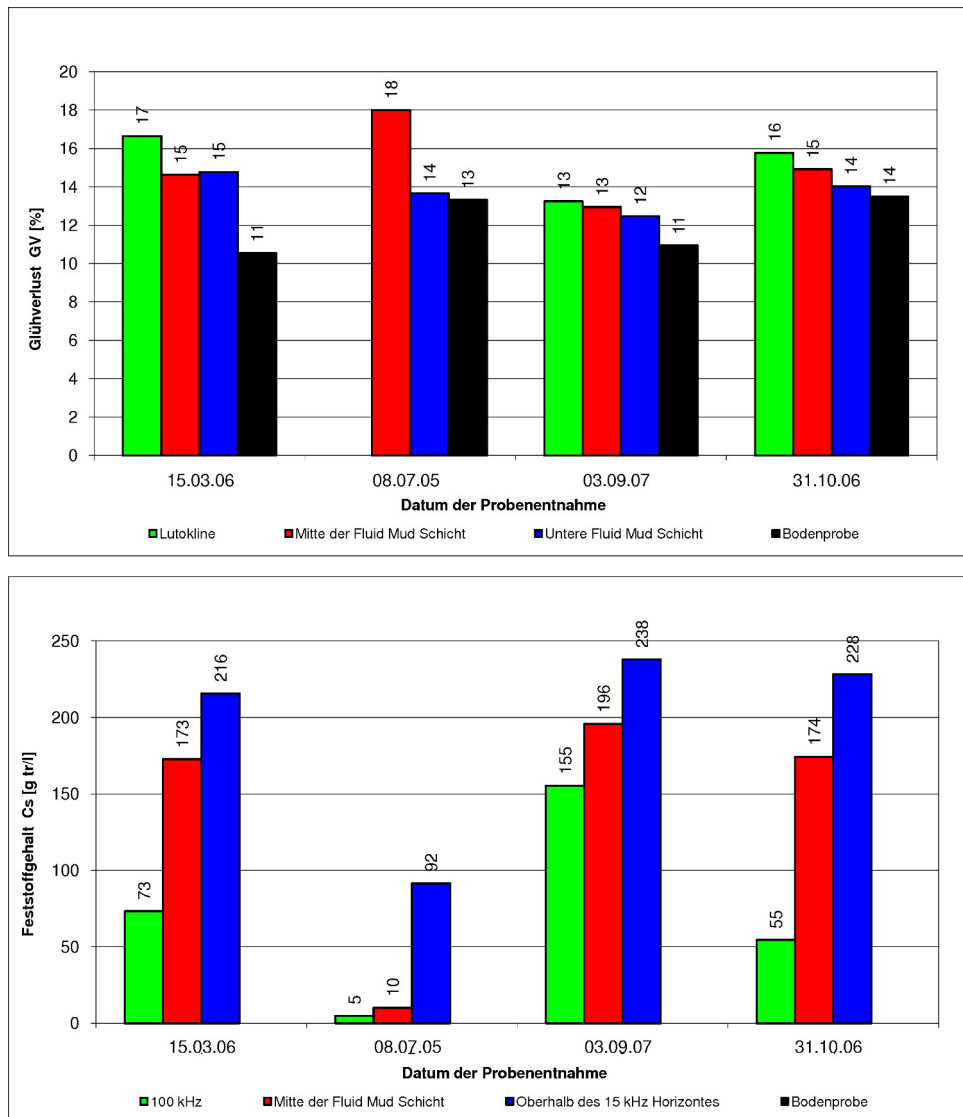


Abb. 208: Glühverluste und Feststoffgehalte im Alten Vorhafen von Brunsbüttel

Bemerkenswert sind die geringen dynamischen Viskositäten der Ruttnerproben in allen Ebenen. Auch das ist ein Hinweis darauf, dass zeitnah vor dem Messeinsatz Baggerungen und Materialumlagerungen durchgeführt worden sind. Bei den Proben handelt es sich damit um frisches aus der Elbe eingetriebenes, noch nicht abgesetztes Material. Die entnommene Bodenprobe hatte viskoelastische Eigenschaften. Die Fließgrenze wurde im Labor mit $\eta = 4311 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ festgestellt. Die zugehörige Dichte betrug $\rho = 1,2 \text{ t/m}^3$.

Bei allen Beprobungen des Alten Vorhafens lagen die dynamischen Zähigkeiten der Bodenproben an der Fließgrenze zwischen $\eta \approx 1 \text{ bis } 25 \text{ kPa} \cdot \text{s}$ und die zugehörigen Schlickdichten zwischen $\rho \approx 1,2 \text{ bis } 1,3 \text{ t/m}^3$ (Abb. 210). Damit ist die Schiffbarkeit und Manövrierfähigkeit von Schiffen wegen zu hoher Dichten und Zähigkeiten im Bereich des 15 kHz Horizonts nicht mehr gewährleistet.

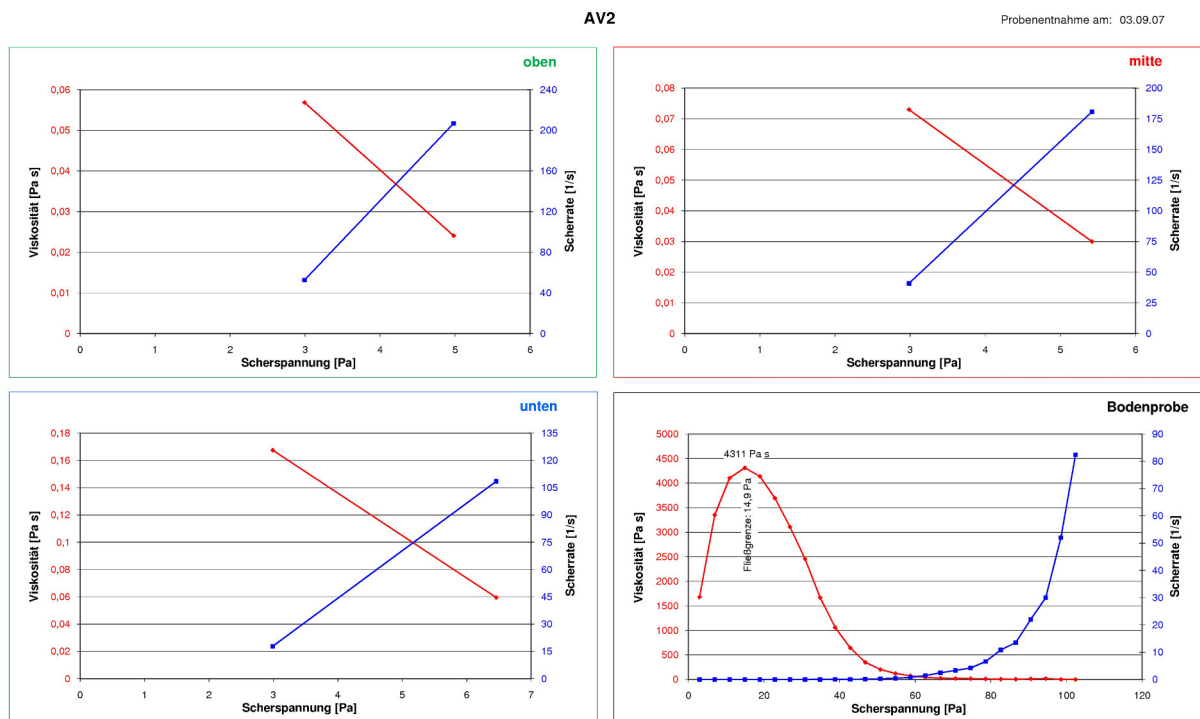
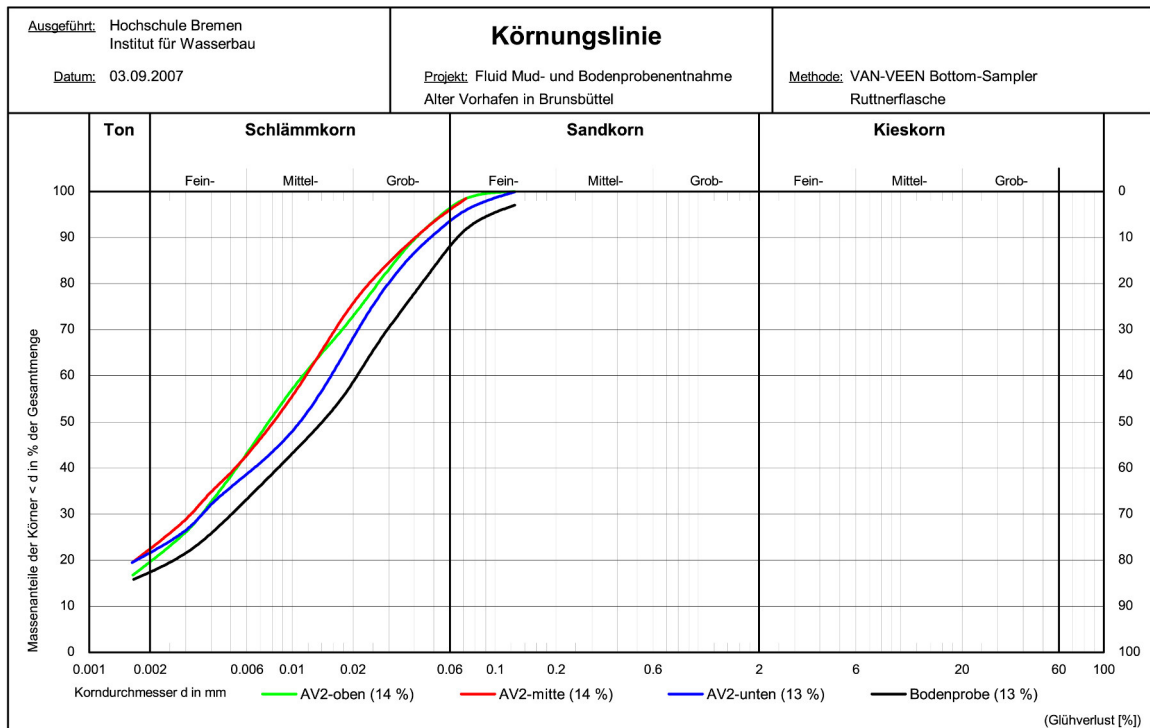


Abb. 209: Körnungslinien und Viskositäten im Alten Vorhafen von Brunsbüttel vom 03.09.2007 (Lage der Proben s. Abb. 195)

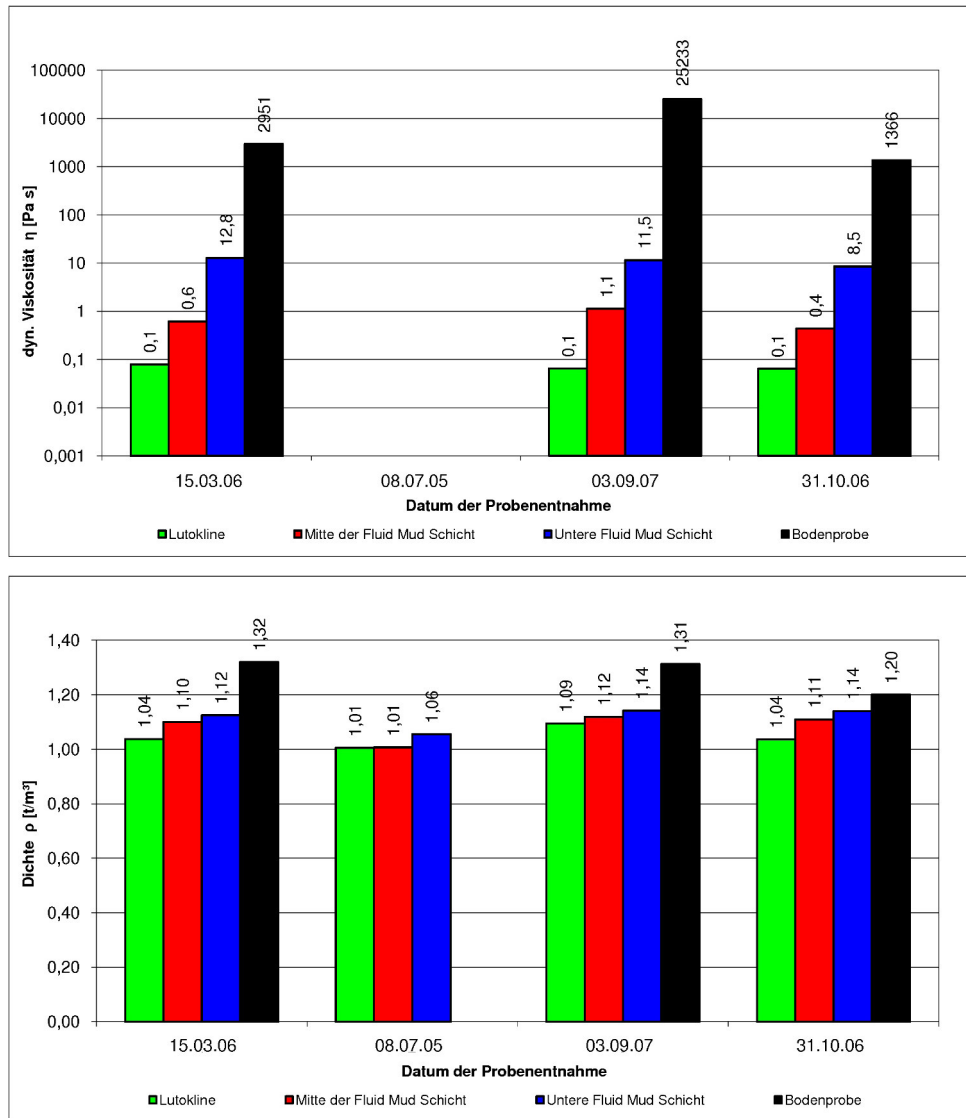


Abb. 210: Dynamische Viskositäten und Dichten im Alten Vorhafen von Brunsbüttel

Für die Ruttnerproben aus der oberen und mittleren Entnahmeebene wurden Viskositäten bis zu $\eta \approx 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ und Dichten von $\rho \leq 1,11 \text{ t/m}^3$ ermittelt (Abb. 210). Die Viskositäten und Dichten sind so gering, dass das Fließverhalten mit dem von reinem Wasser vergleichbar ist. Es handelt sich um den Gesetzen der Schwerkraft folgende Newton'sche Flüssigkeiten. Der Übergang, bei dem die Newton'schen Eigenschaften nicht mehr maßgebend sind beginnt in der unteren Entnahmeebene der Ruttnerproben. Dort wurden im Alten Vorhafen Zähigkeiten von $\eta \approx 9 \text{ bis } 13 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ festgestellt.

DASCH und WURPTS (1999) berichten über Untersuchungen im Emden Außenhafen, dass bei etwa $10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ der Schlick eine Konsistenz erreicht, „dass er nicht mehr ohne weiteres aus einem Behälter herauszukippen war“.

8.4 Zusammenfassende und ergänzende Anmerkungen

Mit Peilplananalysen wurden für die verschiedenen Reviere die Differenzen und das Volumen von doppeltfrequenten Peilungen ermittelt. In erster Näherung wurden die Abstände der Echolothorizonte als Flüssigschlickstärken und die daraus ermittelten Volumen als Fluid Mud Mengen bezeichnet.

Eine Voraussetzung für die Bildung von Flüssigschlick in Brackwasserhäfen sind Sandbarren in den Hafeneinfahrten. Die hinter den Barren tiefer gelegenen Vorhafensohlen begünstigen die Entstehung und Konsolidierung von Flüssigschlick.

Nach den Erkenntnissen aus dem BMBF-Vorhaben 03 KIS 019 wird bei der gegenüber dem Weserfahrwasser um 4 m höher gelegenen Zufahrt zur Nordschleuse die Barre in der Einfahrt bei Bedarf mit Wasserinjektionen abgeflacht. Durch das Sohlengefälle vom Außenhaupt der Schleuse zur Weser werden die während der Flut sohlennah einwärts gerichteten Dichteströmungen gemindert und die während der Ebbe auswärts gerichteten Sohlströmungen verstärkt. Die Bildung von Fluid Mud kann damit unterbunden werden. Diese Unterhaltungsmethode wurde später auch im Vorhafen zur Kaiserschleuse angewandt. Wegen der geänderten Unterhaltungsmethoden in den nördlichen Seehafenzufahrten von Bremerhaven wurden dort nur noch geringe Fluid Mud Mengen und stärkere Feinsandanteile mit entsprechend hohen Dichten bei Bodenproben festgestellt.

Die Peilplananalysen haben gezeigt, dass der Flüssigschlick, dem Gefälle des niederfrequenten Echolothorizonts folgend, in größeren Tiefen stärkere Schichten bildet. Bei ungünstigen Randbedingungen können die Schwebstoffe über die Seeschleusen bis in die abgeschleusten Hafenbereiche gelangen. Auch in Emden werden große Feststoffmengen aus dem Vorhafen über die Seeschleuse in den Binnenhafen transportiert. Die Stärke der Fluid Mud Schichten ist dabei jeweils von der Tiefe des niederfrequenten Signals abhängig. Das dokumentieren die für die einzelnen Reviere in Abschnitt 8.1 dargestellten Längsprofile.

Die langsame Konsolidierung der aus den Tideflüssen eingetragenen Schwebstoffe findet in den strömungsberuhigten Zonen der Vorhäfen statt.

Mit den in Abschnitt 8.2 dargestellten Körnungslinien wird dokumentiert, dass außerhalb der Vorhäfen, in den angrenzenden Tideflüssen, aufgrund ganz anderer Strömungsbedingungen überwiegend gröberes, aus Sandkorn bestehendes, Material anzutreffen ist. Die Glühverluste sind um so höher je stärker der Schlämmkornanteil der Proben ist. Die lediglich aus Sandkorn bestehenden Greiferproben haben sehr geringe organische Anteile.

Der Umwandlungsprozess vom stark schwebstoffhaltigen Wasser zu Flüssigschlick bis zum nicht mehr flüssigen Boden wurden mit Beprobungen zwischen den hoch- und niederfrequenten Echolothorizonten erforscht.

Die in den verschiedenen Revieren erzielten Untersuchungsergebnisse werden im folgenden mit den Beprobungen vom Frühjahr und Herbst 2006 zusammengefasst (Abb. 211).

Die Flüssigschlickproben aus den Brackwasserhäfen zeichnen sich durch hohe Glühverluste aus (Abb. 211, oben links). Im Herbst sind die organischen Anteile geringer als in der biologisch

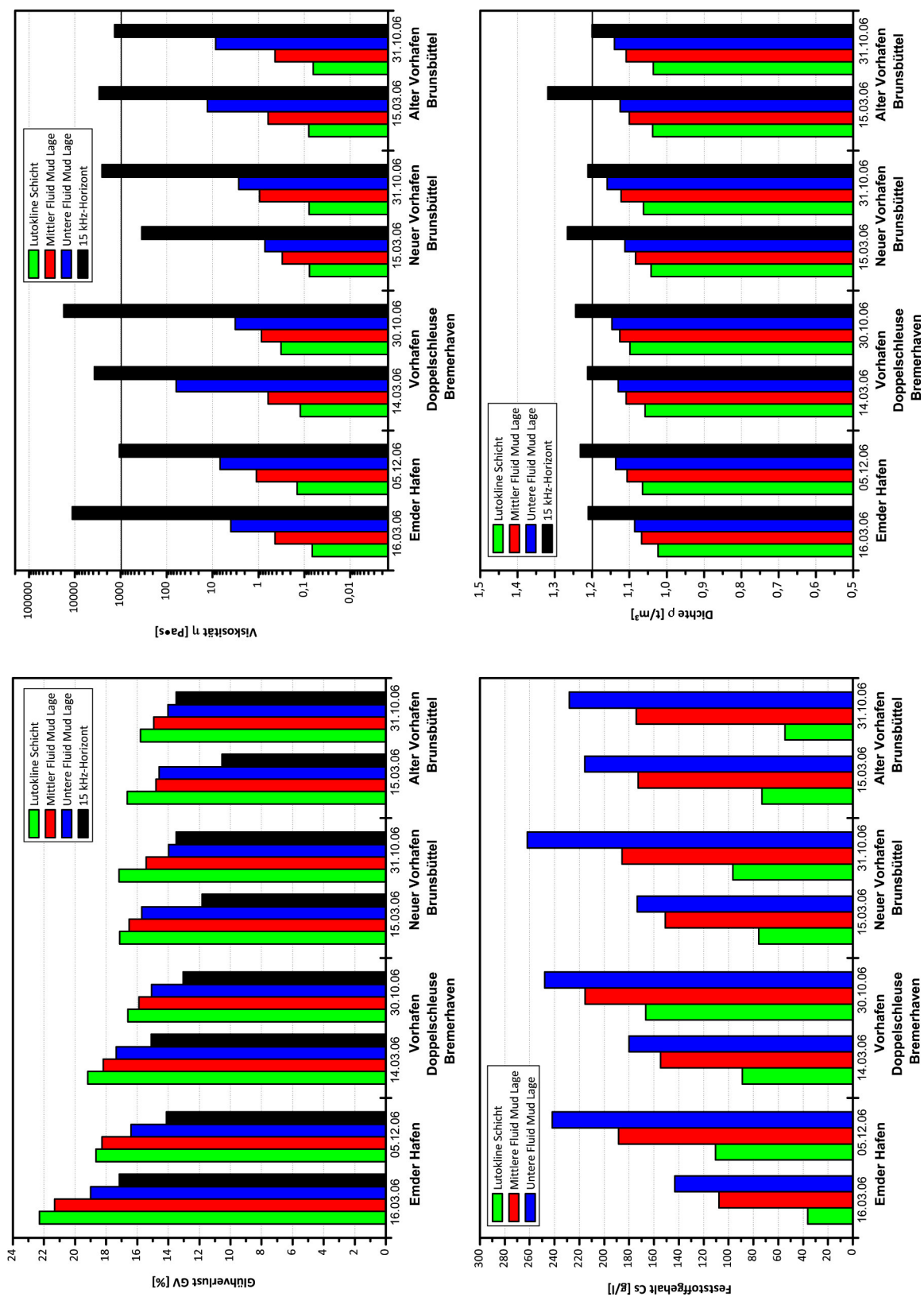


Abb. 211: Eigenschaften von Flüssigschlick in den verschiedenen Brackwasserhäfen

aktiveren Jahreszeit. Die Unterschiede sind in Emden und Bremerhaven deutlicher als in Brunsbüttel. Das kann auf die dort stärkeren betrieblichen Einflüsse zurückgeführt werden. Neben dem sehr starken Schiffsverkehr, der Entwässerung des Nord-Ostsee-Kanals über den Alten Vorhafen, sind die konventionellen Baggertätigkeiten zu nennen. Damit wird Baggergut in größeren Mengen aus den Vorhäfen ausgeräumt und umgelagert.

Im Übrigen spielen neben den saisonalen Einflüssen auch die Baggertätigkeiten bei der Beurteilung der Glühverluste für die Bodenproben (schwarze Balken in Abb. 211) eine Rolle. Aus den Bodenanalysen ist bekannt, dass die Glühverluste mit dem Anteil der Schlämmkornfraktionen korrelieren. So waren in Emden und Bremerhaven die Feinsandanteile der Bodenproben im März geringer als bei den Beprobungen im Herbst 2006. Das hat zusätzlich zu den höheren organischen Anteilen geführt.

Im Neuen und Alten Vorhafen von Brunsbüttel wurden im Oktober bei den Bodenproben (schwarze Balken in Abb. 211) höhere Glühverluste festgestellt als im März 2006. Im Alten Vorhafen war der Feinsandanteil mit im Mittel 29% im März etwa doppelt so hoch wie im Herbst. Auch im Neuen Vorhafen waren im Herbst größere Schlämmkornanteile zu finden als im Frühjahr. Die veränderten, auf betriebliche und unterhaltungstechnische Ursachen, zurückzuführenden unterschiedlichen Sohlenverhältnisse haben 2006 in Brunsbüttel offenbar bei den Bodenproben über die saisonalen Einflüsse dominiert. Die noch nicht konsolidierten Ruttnerproben weisen auch für die Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal in der späteren Jahreszeit geringere organische Anteile auf. Insgesamt hat sich bei den Untersuchungen ein Trend zu höheren Glühverlusten in der ersten Jahreshälfte für die Ruttner- und Bodenproben gezeigt. Die mit der Tiefe zunehmenden Feststoffgehalte der Wasserproben sind im Frühjahr in allen Schichten geringer als im Herbst, wie es die Beispiele in Abb. 211 (links unten) zeigen.

Sämtliche aus dem Bereich des niedrigen 15 kHz Horizonts gezogenen Bodenproben waren nicht flüssig. Bis auf das eine in Abb. 211 (rechts) dargestellte Ergebnis vom 15. März 2006 für den neuen Vorhafen Brunsbüttel betrugen die mit dem Rheometer ermittelten mittleren dynamischen Viskositäten $\eta > 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. In diesem Zusammenhang sei nochmals erwähnt, dass die Viskositätsanalysen mit dem Rheometer vor allem bei den Bodenproben erheblichen Schwankungen unterworfen sind. Genauer sind die im Labor bestimmten Dichten der Bodenproben, die bei allen Revieren Werte von $\rho > 1,2 \text{ t/m}^3$ ergeben haben. Damit ist der 15 kHz Horizont als nicht mehr schiffbar auszuweisen. Das gilt sowohl für die dynamischen Zähigkeiten als auch für die Dichte des dort anstehenden verfestigten Schlicks.

Die Ruttnerproben aus dem Bereich der Lutokline (grüne Balken) und der mittleren Fluid Mud Lage (rote Balken) weisen noch sehr geringe Viskositäten von $\eta \leq 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ und Dichten von $\rho < 1,15 \text{ t/m}^3$ auf. Es handelt sich dabei um Flüssigkeiten mit noch annähernd Newton'schen Eigenschaften, die als schiffbar eingestuft werden können.

Merklich zähere Eigenschaften haben die Flaschenproben aus der unteren Ebene in der die dynamischen Zähigkeiten vereinzelt Werte von $\eta > 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ und $\rho > 1,15 \text{ t/m}^3$ erreicht haben. Dort beginnt der Übergang zu dem nicht Newton'schen Fließverhalten und einer Übergangszone zum nicht mehr schiffbaren Bereich. Die untere Entnahmeebene mit der Ruttnerflasche lag bei

70 bis 80% der Fluid Mud Stärke (d) (Abb. 212).

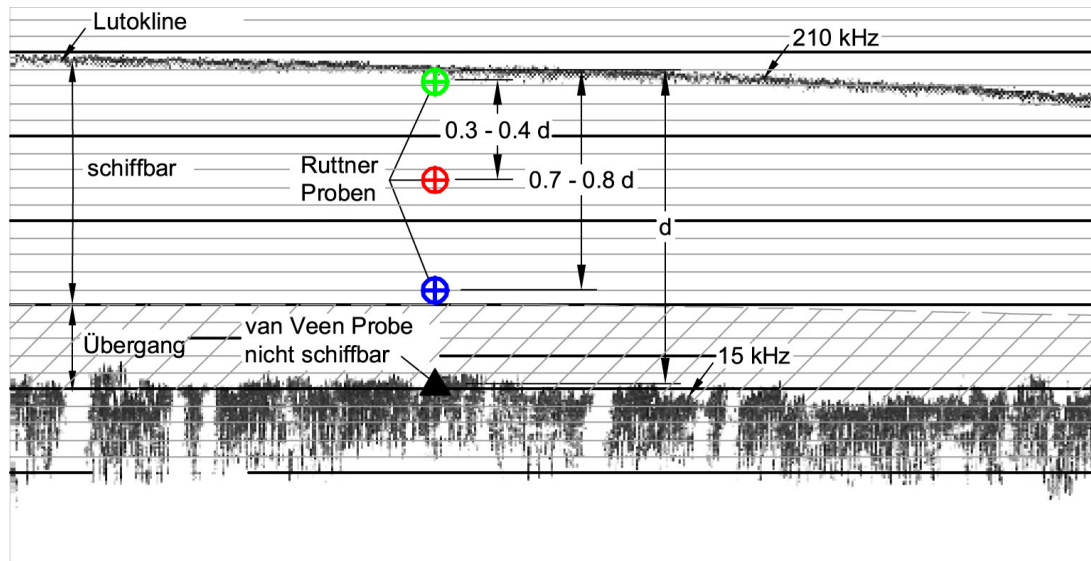


Abb. 212: Entnahmepositionen in verschiedenen Tiefen in der Fluid Mud Schicht (Peilung vom Dezember 2006 im Emden Außenhafen)

9 Schlussbemerkungen

Die hydrodynamischen und morphologischen Vorgänge in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen an der Ems und Weser wurden mit dem vom BMBF geförderten KFKI Projekt 03 KIS 019 untersucht. Damit wurde die Grundlage für ein gleichzeitig durchgeführtes kooperatives Forschungsvorhaben am Franzius-Institut der Universität Hannover für numerische Modelluntersuchungen geschaffen (BMBF 03 KIS 020).

Mit diesem BMBF Projekt 03 KIS 051 „Eigenschaften und Verhalten von Fluid Mud in Brackwasserhäfen“ waren die Messungen in der Natur zu erweitern.

Im einzelnen waren Strömungsmessungen in den an die Vorhäfen angrenzenden Tidenströmen durchzuführen. Außerdem waren noch der Vorhafen zur Doppelschleuse in Bremerhaven und die Vorhäfen des Nord-Ostsee-Kanals in Brunsbüttel messtechnisch zu erfassen.

Zusätzlich waren in den verschiedenen Revieren die mit der Tiefe veränderlichen Fluid Mud Eigenschaften wie Dichte, Zähigkeit, Feststoffgehalt und organischer Anteil von Interesse. Nach Abschluss dieses vom BMBF geförderten KFKI-Projekts 03 KIS 051 liegen für die brackwasserbeeinflussten Vorhäfen an der Ems, Weser und Elbe große Datenmengen vor, die für eine verbesserte Anwendbarkeit und Aussagefähigkeit von numerischen Modelluntersuchungen dienen können. Die Ergebnisse aus diesem Vorhaben wurden in den vom BMBF geförderten Projekten 03 KIS 065 „Erweiterung eines morphodynamisch-numerischen Simulationsmodells zur Simulation der Dynamik von Flüssigschlick (Fluid Mud) im Bereich der deutschen Nordseeküste und der angrenzenden Ästuar- und Tideflüsse“, Institut für Wasserbau der Universität Darmstadt und 03 KIS 066/067 „Beschreibung der Dynamik (Entstehung, Entwicklung und Transport)

von Flüssigschlick auf der Grundlage der physikalischen Prozesse und deren mathematische Implementation zum Sedimentmanagement in Küstengewässern“, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Hamburg und Universität der Bundeswehr München (Hydromechanik und Wasserbau) bereits für numerische Betrachtungen verwendet.

Die grundlegenden hydrodynamischen und morphologischen Vorgänge in den Brackwasserhäfen der Tideflüsse Ems, Weser und Elbe sind allgemein gültig. Das gilt z. B. für die Flutstromdominanz in den Tideflüssen oder positiven Feststoffbilanzen der Vorhäfen. Die Strömungs- und Dichteeffekte haben in den Vorhäfen ebenfalls das gleiche Verhaltensmuster. Das gilt auch für die daraus resultierenden unterschiedlichen Kornverteilungen, der sich in den Vorhäfen und Einfahrtbereichen absetzenden Sedimente.

Die Eigenschaften von Fluid Mud wie z. B. Feststoffkonzentration und organischer Anteil sind jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Flüssigschlick entsteht in strömungsberuhigten Vorhafenbereichen. Gute Voraussetzungen bilden die hinter Barren in den Hafeneinfahrten liegenden Wannen. Der Flüssigschlick entsteht aus den mit der Tideströmung in die Vorhäfen eingetragenen Schwebstoffen.

Die mit den Untersuchungen gemessenen Daten, wie Strömungsgeschwindigkeiten im Tidestrom oder die Walzen- und Dichteströmungen sind in jedem Revier anders. Das liegt z. B. an den unterschiedlichen Tidewassermengen, Ausbauzuständen der Ströme und Vorhäfen sowie deren Abmessungen, Geometrie und Lage zum Strom. Da das anstehende Sohlenmaterial und die Fluidmudeigenschaften eine Folge der Strömungsvorgänge sind, sind die absoluten Werte ebenfalls in jedem Revier verschieden. Miteinander vergleichbar und allgemein gültig sind die Veränderungen des Flüssigschlicks innerhalb der Echolothorizonte bis hin zur festen Sohle. Das gilt auch für die unterschiedliche Zusammensetzung des Sohlenmaterials im Ablösungs- und Staubeereich der Hafeneinfahrten und innerhalb der Vorhäfen. Die tide- und oberwasserabhängigen Salz- und Schwebstoffkonzentrationen haben ebenfalls in den untersuchten Revieren verallgemeinbare Verhaltensmuster.

Die in dem BMBF-Projekt gewonnenen Erkenntnisse waren nur durch die gute Zusammenarbeit mit Niedersachsen Ports Emden, bremenports Bremerhaven und dem Wasser- und Schifffahrtssamt (WSA) Brunsbüttel möglich. Dafür sei an dieser Stelle ebenso gedankt wie dem BMBF für die Förderung des Instituts für Wasserbau der Hochschule Bremen und der KFKI-Projektgruppe für die anregenden Diskussionen.

Schrifttum

- BARG, G.: *Untersuchungen über Salzgehaltsverteilungen in Brackwassergebieten von Tideflüssen am Beispiel der Unterweser*. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 49, 1979.
- BRINKMANN, B.: *Ein Beitrag zur Bestimmung des Wasseraustausches zwischen Fluß und Hafen in Tidegebieten*. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 70, 1996.
- BROE, E. DE: *Controlling Sediment Accumulation behind the Locks of Zandvliet and Berendrecht*. PIANC, Bull. No. 112, 2003.
- CHRISTIANSEN, H. und HAAR, S.: *Sedimentationsverhältnisse in Hamburger Hafenbecken. Auswertungen der Peilungen von 1977 bis 1995. Gewässerkundliche Studie Nr. 15*. Strom- und Hafenbau Hamburg, Referat Gewässerkunde, 1996.
- DASCH, W. und WURPTS, R.: *Isovisken als Beurteilungsparameter*. Hansa, Heft 9, 1999.
- DURSTHOFF, W.: *Über den quantitativen Wasseraustausch zwischen Fluß und Hafen*. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 34, 1970.
- EYSINK, W. D.: *Sedimentation in Harbour Basins small Density Differences may cause serious Effects*. 9th International Harbour Congress, Antwerpen, Belgium, Proceedings, 1988.
- FÜHRBÖTER, A. und WITTE, H.-H.: *Über Sedimentationen in Tidehäfen*. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 43. Band, 1988.
- FRANZIUS-INSTITUT: *Modellversuche für den Köhlfleet Hamburg*. Versuchsbericht, 1988.
- GORDON, R. L.: *Acoustic Doppler Current Profiler. Principles of Operation, second Edition for Broadband ADCPs*. RD Instruments, San Diego, 1996.
- GREISER, N., GRESIKOWSKI, S. und HARMS, H.: *Feststofftransport und Verschlickung im Emder Hafen*. 1992. Universität Hamburg, Institut für allgemeine Botanik, Abteilung Mikrobiologie, unveröffentlicht.
- HANSESTADT BREMISCHES HAFENAMT (HBH) BREMERHAVEN: *Bearbeitung der Baggergutproblematik in den Bremischen Häfen von Bremerhaven*. HBH Bremerhaven, 2000.
- HENSEN, W.: *Die Entwicklung der Fahrwasserverhältnisse in der Außenelbe*. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, Bd. 18, Springer-Verlag, 1941.
- HENSEN, W.: *Modelluntersuchungen für den Amerikahafen in Cuxhaven*. Mitteilungen der Hanoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau, Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover, Heft 4, 1953.

- HENSEN, W.: *Probleme bei der Regelung von Tideflüssen*. Jahresheft der Staatlichen Ingenieurschule Suderburg, 1963.
- HOCHSCHULE BREMEN, INSTITUT FÜR WASSERBAU (IWA): *Hydrodynamische und morphologische Vorgänge in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen -In situ Messungen-. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 03KIS019*. 2003. Unveröffentlicht.
- HOCHSCHULE BREMEN, INSTITUT FÜR WASSERBAU (IWA): *Eigenschaften und Verhalten von Fluid Mud. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 03KIS051*. 2009. Unveröffentlicht.
- HOCHSCHULE BREMEN, LABOR FÜR WASSERBAU (LFW): *Sedimentation in Tidehäfen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben MTK 0470*. 1992. Unveröffentlicht.
- HOCHSCHULE BREMEN, LABOR FÜR WASSERBAU (LFW): *Sedimentation in Tidehäfen, Phase 2. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben MTK 0544*. 1996. Unveröffentlicht.
- NASNER, H.: *Sedimentationsverhältnisse im Tidegebiet von Bremerhaven*. 1989. Unveröffentlicht.
- NASNER, H.: *Sedimentationsuntersuchungen vor der Stromkaje Bremerhaven Überseehafen*. 1991. Unveröffentlicht.
- NASNER, H.: *Sedimentation in Tidehäfen*. Die Küste, Heft 53, 1992.
- NASNER, H.: *Sedimentation in Tidehäfen Phase 2*. Die Küste, Heft 59, 1997.
- NASNER, H.: *Hydrodynamische und morphologische Vorgänge in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen -In situ Messungen-*. Die Küste, Heft 68, 2004a.
- NASNER, H.: *Sedimentation im Wendebecken des Überseehafens in Bremerhaven. Auswirkungen durch den Schleusenbetrieb*. 2004b. Unveröffentlicht.
- NASNER, H.: *Containerterminal "Wilhelm Kaisen" in Bremerhaven. Unterhaltungsaufwand im südlichen Bereich*. 2005. Unveröffentlicht.
- NLWKN: *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Weser- und Emsgebiet, 2004*. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 2007.
- PIANC: *Minimising Harbour Siltation*. Report 102, 2008.
- PIEPER, R. und TORN, P.: *Treibkörpermessungen im Real-Time DGPS*. Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, Band 50, 1996.
- ROHR, F.: *Wasser- und Sinkstoff-Bewegungen in Fluß- und Seehäfen. Untersuchungen aus dem Flußlaboratorium der Technischen Hochschule Karlsruhe*. R. Oldenbourg, München, 1933.
- SCHULT, H.: *Problematik der Vermessung der Gewässersohlen in den Schlickgebieten von Bremerhaven*. Diplomarbeit, Dep. Geomatik, Hafen-City Universität, Hamburg, 2007. Unveröffentlicht.

- SCHWARZE, H.: *Reduction of sedimentation in harbour entrances on tidal rivers by modifications of the entrance geometry and installation of stream guiding structures*. In: Fourth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC), Rio de Janeiro, Brazil, 1995.
- STÜCKRATH, T.: *Über die Durchmischung von Süß- und Salzwasser in den Brackwassergebieten von Tideflüssen*. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Techn. Universität Hannover, Heft 35, 1970.
- STOSCHEK, O.: *Sedimentation und Gegenmaßnahmen in tide- und brackwasserbeeinflussten Häfen: Eine Analyse mit Hilfe von 3-dimensionaler Simulationen*. Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, Heft 90, 2003.
- VAN LEEUWEN, S. und HOFLAND, B.: *The Current Deflection Wall in a Tidal Harbour with Density Influences*. Final Report, Delft Hydraulics, 1999.
- VISSCHER, G. und WOLTERING, S.: *Messungen des tideabhängigen Schwebstoffgehaltes in der Brackwasserzone der Weser bei Bremerhaven*. Wasser und Boden, 50. Jahrgang, 1998.
- VOLLMERS, H.-J.: *Systematik der Maßnahmen zur Verringerung der Schwebstoffablagerungen in Binnenhafenmündungen*. 152. Arbeit aus dem Theodor-Rebock-Flußlaboratorium. Technische Hochschule Karlsruhe, 1963.
- WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION (WSD) NORD: *Ab 01.01.2005 gültige SKN-Werte an den Tidepegeln im Bereich der ESD Nord (nachrichtlich WSD Ost und Hamburg Port Authority (HPA) ehemals Amt für Strom- und Hafenbau Hamburg)*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, 2007.
- WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION (WSD) NORTHWEST: *Ab 01.01.2008 gültige SKN-Werte an den Pegeln im Bereich der WSD Northwest*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, 2007.
- WURPTS, R.: *15 Jahre Erfahrung mit Fluid Mud*. Hansa 140. Jg. Nr. 10, 2003.
- WURPTS, R. und TORN, P.: *15 Years Experience with Fluid Mud: Definition of the Nautical Bottom with Rheological Parameters*. Terra et Aqua, Number 99, 2005.

Vorträge und Veröffentlichungen des vom BMBF geförderten KFKI-Projektes 03 KIS 051

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten im BMBF-Projekt 03 KIS 051 haben wieder ein erfreuliches Interesse in der Fachwelt hervorgerufen. Das zeigt die folgende Liste von Vorträgen und Veröffentlichungen.

- | | |
|--|--|
| NASNER, H.: | Prevention of Sedimentation in Brackish Harbour Basins.
8 th International Conference on Cohesive Sediment Transport, 20. bis 23.09.2005 in Saga, Japan; Proceedings 8 th INTERCOH 2005 |
| PIEPER, R.,
NASNER, H.: | Flüssigschlick in der Ems und Weser.
Tagungsband HTG-Kongress 2005 in Bremen vom 14. bis 17.09.2005 |
| NASNER, H.,
WESTERMEIER, F.: | Management of Fluid Mud in Brackish Water Harbours.
31 th PIANC-Congress, 14. bis 18.05.2006 in Estoril, Portugal
Proceedings 31 th PIANC-Congress |
| NASNER, H.,
PIEPER, R.,
TORN, P.,
KUHLENKAMP, H.: | Prevention of Sedimentation in Brackish Water Harbours.
30 th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), 03. bis 08.09.2006 in San Diego, USA; Proceedings 30 th ICCE |
| NASNER, H.: | Maintenance Work in Harbours with Fluid Mud.
3 rd Chinese-German Joint Symposium in Coastal and Ocean Engineering, 08. bis 16.11.2006 in Tainan, Taiwan |
| NASNER, H.,
PIEPER, R.,
TORN, P.,
KUHLENKAMP, H.: | Properties of Fluid Mud and Prevention of Sedimentation.
World Dredging Conference (WODCON) XVIII, Mai/Juni 2007 in Orlando, USA; Proceedings WODCON XVIII |
| NASNER, H.,
PIEPER, R.,
TORN, P.: | Behaviour and Properties of Fluid Mud.
7 th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (PIANC-COPEDEC VII), 24. bis 28.02.2008 in Dubai, Vereinigte Arabische Emirate
Proceedings 7 th COPEDEC |

- NASNER, H.: Eigenschaften und Verhalten von Fluid Mud in Brackwasserhäfen.
13. KFKI Seminar zur Küstenforschung, 05.11.2008 in Bremerhaven;
Tagungsband zum 13. KFKI Seminar
- NASNER, H.: Sediment Properties in Harbours in the Brackish Zone.
Chinese-German Joint Symposium on Hydraulics and Ocean Engineering, 21. bis 27. September 2010 in Tianjin, China; Proceedings
JOINT 2010

Abbildungsverzeichnis

1	Deutsche Nordseeküste	1
2	Strömungs-, Tide- und Dichteeffekt, schematisch	2
3	Hafenanlagen von Bremerhaven	6
4	Nord- und Kaiserschleuse in Bremerhaven	7
5	Fischereihafenschleuse in Bremerhaven	8
6	Lageplan des Emder Vor- und Außenhafens	10
7	Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal in Brunsbüttel	11
8	Erste und zweite Dopplerverschiebung des Schallimpulses (GORDON, 1996) . . .	12
9	Peilung vom August 2005 (WSA Bremerhaven) und November 2005 (bremenports)	15
10	Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-	
	Messungen am 25.04.2005, Ebbestromkenterung und 1. Flutphase	16
11	Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-	
	Messungen am 25.04.2005, 2. Flutphase	17
12	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 25.04.2005	19
13	Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-	
	Messungen am 25.04.2005, 3. Flutphase	20
14	Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-	
	Messungen am 25.04.2005, 4. Flutphase	21
15	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 25.04.2005	23
16	Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-	
	Messungen am 18.04.2005, 1. Ebbephase	24
17	Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-	
	Messungen am 18.04.2005, 2. Ebbephase	25
18	Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-	
	Messungen am 18.04.2005, 3. Ebbephase	26
19	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 18.04.2005	28
20	Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, ADCP-	
	Messungen am 18.04.2005, 4. Ebbephase	29
21	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 18.04.2005	30
22	Salzgehalte im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, Flut am 26.04.2005 . .	31
23	Salzgehalte im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, Ebbe am 20.04.2005 .	33
24	Schwebstoffe im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, Flut am 26.04.2005 .	35
25	Schwebstoffe im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, Ebbe am 20.04.2005 .	36
26	Flutstrommessungen vor der Nordschleuse in Bremerhaven am 22.05.2001	38
27	Flutstrommessungen vor der Nordschleuse in Bremerhaven am 22.05.2001	39
28	Ebbestrommessungen vor der Nordschleuse in Bremerhaven am 16.05.2001	41
29	Ebbestrommessungen vor der Nordschleuse in Bremerhaven am 16.05.2001	42
30	Salzgehalte im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, Flut am 23.05.2001 . .	44
31	Salzgehalte im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, Ebbe am 17.05.2001 .	46

32	Schwebstoffe im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, Flut am 23.05.2001 .	47
33	Schwebstoffe im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, Ebbe am 17.05.2001 .	49
34	Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 04.10.2005, 1. Flutphase	51
35	Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 04.10.2005, 2. Flutphase	52
36	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 04.10.2005	53
37	Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 04.10.2005, 3. Flutphase	54
38	Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 04.10.2005, letzte Flutphase	55
39	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 04.10.2005	57
40	Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 12.10.2005, 1. Ebbephase	58
41	Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 12.10.2005, 2. Ebbephase	59
42	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 12.10.2005	60
43	Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 12.10.2005, 3. Ebbephase	61
44	Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 12.10.2005, letzte Ebbephase	62
45	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 12.10.2005	63
46	Salzgehalte im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, Flut am 07.10.2005 .	65
47	Salzgehalte im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, Ebbe am 13.10.2005 .	67
48	Schwebstoffe im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, Flut am 07.10.2005	69
49	Schwebstoffe im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, Ebbe am 13.10.2005	70
50	Flutströmungen vor der Kaiserschleuse in Bremerhaven am 17.10.2001	72
51	Flutströmungen vor der Kaiserschleuse in Bremerhaven am 17.10.2001	73
52	Ebbeströmungen vor der Kaiserschleuse in Bremerhaven am 25.10.2001	74
53	Ebbeströmungen vor der Kaiserschleuse in Bremerhaven am 25.10.2001	75
54	Salzgehalte im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, Flut am 23.10.01 . . .	77
55	Salzgehalte im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, Ebbe am 26.10.01 . .	79
56	Schwebstoffe im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, Flut am 23.10.01 . .	80
57	Schwebstoffe im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, Ebbe am 26.10.01 .	82
58	Strömungen in der Weser im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 28.06.2006, erste Flutphase	84
59	Strömungen in der Weser im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 28.06.2006, letzte Flutphase	85
60	Überlagerung von Strömungs- und Dichteeffekten im Vorhafen zur Doppelschleuse; ADCP-Messung am 26.06.2006	87

61	Strömungen in der Weser im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 05.07.2006, erste Ebbephase	88
62	Strömungen in der Weser im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, ADCP-Messungen am 05.07.2006, letzte Ebbephase	89
63	Salzgehalte im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, Flut am 27.06.2006 .	91
64	Salzgehalte im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, Ebbe am 06.07.2006	92
65	Schwebstoffe im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, Flut am 27.06.2006	94
66	Schwebstoffe im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven, Ebbe am 06.07.2006	95
67	Lageplan des Emder Hafens mit Peilung vom März 2005 (WSD Nordwest und NHA Emden)	97
68	Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 25.05.2005, 1. Flutphase	98
69	Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 25.05.2005, 2. Flutphase	99
70	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Ems am 25.05.2005	100
71	Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 25.05.2005, 3. Flutphase	102
72	Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 25.05.2005, 4. Flutphase	103
73	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Ems am 25.05.2005	104
74	Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 01.06.2005, 1. Ebbephase	105
75	Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 01.06.2005, 2. Ebbephase	106
76	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Ems am 01.06.2005	108
77	Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 01.06.2005, 3. Ebbephase	109
78	Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, ADCP-Messungen am 01.06.2005, 4. Ebbephase	110
79	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Ems am 01.06.2005	111
80	Salzgehalte im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, Flut am 26.05.2005	112
81	Salzgehalte im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, Ebbe am 02.06.2005	114
82	Schwebstoffe im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, Flut am 26.05.2005	116
83	Schwebstoffe im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden, Ebbe am 02.06.2005	117
84	Flutstrommessungen im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens am 10.06.2002, erste Flutphase	119
85	Flutstrommessungen im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens am 10.06.2002, letzte Flutphase	120
86	Ebbestrommessungen im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens am 04.11.02, erste Ebbephase	121

87	Ebbestrommessungen im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens am 04.11.02, letzte Ebbephase	123
88	Salzgehalte im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens, Flutmessung am 20.07.00	124
89	Salzgehalte im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens, Ebbmessung am 26.07.00	126
90	Schwebstoffe im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens, Flutmessung am 20.07.00	127
91	Schwebstoffe im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens, Ebbmessung am 26.07.00	129
92	Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal in Brunsbüttel, Peilung vom Mai/August 2005	132
93	Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 06.07.2005	133
94	Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 06.07.2005	134
95	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 06.07.2005	135
96	Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 06.07.2005	137
97	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 06.07.2005	138
98	Oberwasserganglinie am Pegel Neu Darchau im März 2007	139
99	Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 20.03.2007	140
100	Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 20.03.2007	141
101	Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 20.03.2007	142
102	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 20.03.2007	143
103	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 20.03.2007	144
104	Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 29.06.2005	145
105	Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 29.06.2005	146
106	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 29.06.2005	148
107	Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 29.06.2005	149
108	Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 29.06.2005	150
109	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 29.06.2005	151
110	Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 13.03.2007	152
111	Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 13.03.2007	154
112	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 13.03.2007	155
113	Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel am 13.03.2007	156
114	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 13.03.2007	157
115	Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 05.07.2005	159
116	Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 05.07.2005	160
117	Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 14.07.2005	161
118	Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 14.07.2005	163
119	Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 21.03.2007	164
120	Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 21.03.2007	165
121	Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 28.06.2005	166
122	Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 28.06.2005	167
123	Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 13.07.2005	169
124	Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 13.07.2005	170
125	Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 14.03.2007	171

126	Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 14.03.2007	172
127	Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 11.07.2005	174
128	Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 11.07.2005	175
129	Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 08.03.2007	176
130	Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 08.03.2007	177
131	Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 14.07.2005	178
132	Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 14.07.2005	179
133	Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 27.03.2007	181
134	Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel am 27.03.2007	182
135	Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 07.07.2005	183
136	Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Ebbemessung am 30.06.2005	184
137	Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 07.03.2007	186
138	Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Ebbemessung am 15.03.2007	187
139	Salzgehalte im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 11.07.2005	189
140	Salzgehalte im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel, Ebbemessung am 14.07.2005	190
141	Salzgehalte im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 08.03.2007	191
142	Salzgehalte im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel, Ebbemessung am 27.03.2007	192
143	Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 07.07.2005	194
144	Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Ebbemessung am 30.06.2005	195
145	Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 07.03.2007	196
146	Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel, Ebbemessung am 15.03.2007	197
147	Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 11.07.2005	198
148	Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel, Ebbemessung am 14.07.2005	199
149	Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel, Flutmessung am 08.03.2007	200
150	Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel, Ebbemessung am 27.03.2007	202

151	Strömungsgeschwindigkeiten ohne und mit Brackwassereffekt	203
152	Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Nordschleuse 25.04.05	205
153	Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Kaiserschleuse am 04.10.2005	206
154	Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Nordschleuse 18.04.05	207
155	Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Kaiserschleuse am 12.10.2005	208
156	Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in der Weser vor der Geestemündung	209
157	Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Ems bei Emden am 25.05.2005	211
158	Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Ems bei Emden am 01.06.2005	213
159	Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee-Kanal am 06.07.2005	214
160	Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee-Kanal am 20.03.2007	215
161	Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee-Kanal am 29.06.2005	217
162	Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee-Kanal am 13.03.2007	218
163	Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich der Nordschleuse in Bremer- haven bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen	220
164	Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich der Nordschleuse in Bre- merhaven bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen	221
165	Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich der Kaiserschleuse in Bre- merhaven bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen	223
166	Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich der Kaiserschleuse in Bre- merhaven bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen	225
167	Salz- und Schwebstoffgehalte während der Flutstromphase im Bereich der Dop- pelschleuse in Bremerhaven am 27. Juni 2006	226
168	Salz- und Schwebstoffgehalte während der Ebbestromphase im Bereich der Dop- pelschleuse in Bremerhaven am 6. Juli 2006	227
169	Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich des Emder Vor- und Außen- hafens bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen	229
170	Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich des Emder Vor- und Au- ßenhafens bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen	231
171	Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser	232
172	Salzgehalte während der Flutphase im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser	234
173	Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser	235

174	Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser	237
175	Tidewasserstände, Tideströmungen im Strom und Salzgehalte, schematisch . . .	239
176	Strömungs- und Dichteeffekt während der Flutstromphase, schematisch	240
177	Strömungs- und Dichteeffekt während der Ebbestromphase, schematisch	240
178	Untersuchungsbereiche in Bremerhaven und zugehörige Solltiefen (m SKN) . . .	242
179	Peilung und Differenzplan im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven vom November 2006	245
180	Längsprofile im Vorhafen der Doppelschleuse und der Geeste vom November 2006	246
181	Peilung und Differenzplan im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven vom Fe- bruar 2003	247
182	Peilung und Differenzplan im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven vom Ja- nuar 2004	248
183	Längsprofile im Vorhafen der Nordschleuse vom Februar 2003 und Januar 2004 .	249
184	Peilung und Differenzplan im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven vom Mai 2002	250
185	Längsprofile im Vorhafen der Kaiserschleuse vom Mai 2002	251
186	Peilung und Differenzplan im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden vom Juni 2004	252
187	Längsprofile im Vor- und Außenhafen in Emden vom Juni 2004	253
188	Peilung und Differenzplan im Bereich Neuen und Alten Vorhafens in Brunsbüttel vom Juni 2005	255
189	Längsprofile im Alten und Neuen Vorhafen in Brunsbüttel vom Juni 2005	256
190	Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich der Nordschleuse in Bre- merhaven	257
191	Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich der Kaiserschleuse in Bre- merhaven	259
192	Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven	260
193	Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich des Emder Vor- und Au- ßenhafens	262
194	Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich des Neuen Vorhafens von Brunsbüttel	263
195	Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich des Alten Vorhafens von Brunsbüttel	264
196	Ruttner-Probe aus der Lutokline im Alten Vorhafen von Brunsbüttel am 31.10.2006	266
197	Entnahmepositionen innerhalb der Fluid Mud Schicht (Peilung vom Dezember 2006 im Emder Außenhafen)	267
198	Bodenprobe aus dem Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven vom 15.03.2006	267
199	Glühverluste und Feststoffgehalte im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven	268

200	Körnungslinien und Viskositäten im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven vom 20.02.2007	270
201	Dynamische Viskositäten und Dichten im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven	271
202	Glühverluste und Feststoffgehalte im Emder Vor- und Außenhafen	272
203	Körnungslinien und Viskositäten im Vor- und Außenhafen in Emden vom 04.09.07	273
204	Dynamische Viskositäten und Dichten im Emder Vor- und Außenhafen	274
205	Glühverluste und Feststoffgehalte im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel	276
206	Körnungslinien und Viskositäten im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel vom 03.09.07	277
207	Dynamische Viskositäten und Dichten im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel . . .	278
208	Glühverluste und Feststoffgehalte im Alten Vorhafen von Brunsbüttel	279
209	Körnungslinien und Viskositäten im Alten Vorhafen von Brunsbüttel vom 03.09.07	280
210	Dynamische Viskositäten und Dichten im Alten Vorhafen von Brunsbüttel	281
211	Eigenschaften von Flüssigschlick in den verschiedenen Brackwasserhäfen	283
212	Entnahmepositionen in verschiedenen Tiefen in der Fluid Mud Schicht (Peilung vom Dezember 2006 im Emder Außenhafen)	285

GESAMTVERZEICHNIS

der bisherigen „Technischen Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik“

*Bestellungen beim
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung
Franziska-Braun-Straße 7, D-64287 Darmstadt*

- | | |
|--|---|
| Nr. 1/1965
H. Lacher | (vergriffen)
Über das Kriechverhalten destillierter Bitumina unter Zugrundelegung der Theorie der linearen Viskosität |
| Nr. 2/1966
J. Bock | Einfluß der Querschnittsform auf die Widerstandsbeiwerte offener Gerinne |
| Nr. 3/1967
P. Unger | (vergriffen)
Berechnung instationärer Abflußvorgänge in natürlichen Gerinnen unter Verwendung eines von der Gerinneform unabhängigen Rauigkeitsmaßes |
| Nr. 4/1968
W. Tiedt | (vergriffen)
Berechnung des laminaren und turbulenten Reibungswiderstandes konzentrischer und exzentrischer Ringspalte |
| Nr. 5/1969
R. Schröder
B. Scherer | Häufigkeitsanalyse hydrologischer Daten
Unverzerrtes Hele-Shaw-Modell für instationäre Grundwasserströmungen mit freier Oberfläche |
| Nr. 6/1970
D. Krause | Einfluß der Trassierungselemente auf den Spiegelverlauf in gekrümmten Schussrinnen |
| Nr. 7/1971
W. Tiedt | Hydrodynamische Untersuchung des Teilfüllungsproblems, Gesetzmäßigkeiten des Abflusses in technisch rauhen Kreisgerinnen bei laminarer und turbulenter Strömung |
| Nr. 8/1972
M. T. Monzavi | Widerstandsgesetz auf statistischer Basis für extreme natürliche Rauigkeiten in Druckrohren |
| Nr. 9/1973
B. Scherer | Die Entwicklung und Anwendung eindimensionaler Modelle der zweidimensionalen Grundwasserbewegungen in Fluß-, Graben- und Drainnähe |
| Nr. 10/1973
diverse Autoren | (vergriffen)
Sammlung von Kurzberichten 1965 – 1972 |

- Nr. 11/1974** (vergriffen)
 E. Zäschke Widerstandsmindernde Wirkung hochmolekularer Zusätze beim Transport Newtonscher Flüssigkeiten in geschlossenen Leitungen
 R. Schröder u. Über das hydraulische Widerstandsverhalten von Beton- und Stahlbeton-
 D. Knauf rohren im Übergangsbereich
 H. Lacher Konstruktionshilfe für Strömungsnetze ebener Potentialströmungen mittels Elementarströmungen
 H. Lacher u. Einfluß von Teilfüllungsgrad und von Wanddicke des porösen
 M. T. Monzavi Rohrmantels auf die Ergiebigkeit von Betonfilterrohren
 H. Lacher u. Untersuchung zur Ermittlung der Abflußleistung poröser Betonfilterrohre
 K. J. Ueker unter natürlichen Bedingungen
 G. Euler u. Berechnung von Hochwasserabläufen mit Näherungsverfahren und
 A. Koussis Anwendung
 H. Lacher Neuere Methoden der Wissensvermittlung im Fach „Hydraulik“, erläutert am Lehrbeispiel „Hydrostatik räumlich gekrümmter Oberflächen“
- Nr. 12/1974**
 H. J. Dallwig Fließformeln und Formbeiwert - eine kritische Untersuchung üblicher
 Berechnungsmethoden für Gerinneströmungen
 R. Schröder Wirkung periodischer Wandwelligkeiten auf den Strömungswiderstand
- Nr. 13/1974** (vergriffen)
 D. Belke Die statistische Analyse von Grundwasserständen mit dem Ziel der Extremwertprognose
- Nr. 14/1975** (vergriffen)
 G. Euler Die Simulation der Niederschlagsaufteilung für Hochwasserabfluß-Modelle
- Nr. 15/1975**
 A. Koussis Ein verbessertes Näherungsverfahren zur Berechnung von Hochwasserabläufen
- Nr. 16/1975**
 G. Lass Berechnung von Horizontalfilterbrunnen mit beliebig angeordneten Filterrohren
- Nr. 17/1976** (vergriffen)
 D. Knauf Die Abflußbildung in schneebedeckten Einzugsgebieten des Mittelgebirges
- Nr. 18/1977**
 H. Bischoff Die Berechnung von Potentialfeldern mit der Randintegralmethode, dargestellt am Beispiel der ebenen Grundwasserbewegung
- Nr. 19/1977**
 I. David Grundwasserfassungsanlagen mit Filterrohren
- Nr. 20/1977** (vergriffen)
 Diverse Autoren Sammlung von Kurzberichten 1972 - 1977
- Nr. 21/1978**
 O. Gieseler Einfluß der äquivalenten Sandrauhigkeit auf die Lage des Wechselsprungs bei Umlenkung eines frei fallenden runden Flüssigkeitsstrahls an einer ebenen Platte

Nr. 22/1978

- R. Schröder Forschungsarbeiten des Instituts für Hydraulik und Hydrologie
D. Belke u. Simulation zur Nutzraumoptimierung einer Talsperre
G. Euler u. Ein detailliertes mathematisches Modell zur Simulation von Hochwasserwellen am Beispiel der Nidda
- R. Wackermann
T. Brandt Der Austausch von Oberflächen- und Grundwasser
R. Schröder Gestaltung von Offshore-Bauwerken für die Kühlwasserversorgung thermischer Kraftwerke
- H. Lacher u. Zum Problem des Regenwasserabflusses auf Fahrbahnen
F. Thiele
W. Tiedt Druckspüler/Spülkasten - ein Beitrag zur Hydraulik zweier Spülsysteme der Sanitärtechnik
O. Gieseler Hydraulische und mechanische Verfahren zur Ermittlung von Rauigkeiten

Nr. 23/1978

- A. Holderbaum Hydraulische Untersuchung zur Ermittlung der Wasserfilmdicken auf berechneten Fahrbahnoberflächen

Nr. 24/1979

- T. Brandt Modell zur Abflußgangliniensimulation unter besonderer Berücksichtigung des grundwasserbürtigen Abflusses

Nr. 25/1980

- N. Könnemann Der wechselseitige Einfluß von Vorland und Flußbett auf das Widerstandsverhalten offener Gerinne mit gegliederten Querschnitten

Nr. 26/1981

- R. Wackermann Ein Rasterverfahren mit flächenvariabler Systemfunktion zur Simulation von Hochwasserganglinien aus großen Einzugsgebieten

Nr. 27/1981

- A. Holderbaum Modellversuche zum Abfluß von Niederschlagswasser auf Verwindungs-Strecken

Nr. 28/1982

- H. J. Dallwig Zur Leistungsfähigkeit von Kelchüberfällen

Nr. 29/1982

- R. Schröder In memoriam Hannes Lacher - Geleitwort
H. Lacher Über die viskoelastischen Eigenschaften von destilliertem Bitumen
H. Lacher u. Experimentelle Erfahrungen mit Filterrohren als Grundlage ihrer hydraulischen Bemessung
R. Schröder
H. Lacher Grundwasserabfluß mit freier Oberfläche, Auszug aus dem Textbuch zur Technischen Hydraulik
- H. Lacher Anwendung der Randintegralmethode zur Berechnung der
B. Söhngen Leistungsfähigkeit von teilgefüllten Rohren
H. Bischoff
H. Lacher Verallgemeinertes Berechnungsverfahren nach Dupuit-Forchheimer für Grundwasserleiter beliebig hoher Durchlässigkeit
- H. Lacher Anwendung der Feldintegralmethode zur Berechnung der
H. Bischoff Durchströmung von Steinschüttedämmen
B. Söhngen
- F. Zior u. Ein neues Meßverfahren für die Bestimmung der
H. Lacher Oberflächenrauigkeit von Kanalwandungen
H. Gerdes u. Die Berechnung dreidimensionaler Grundwasserströmung mit Mitteln der ebenen Potentialtheorie
H. Lacher
F. Zior u. Entwicklung einer konduktometrischen Sonde zur Messung von

Fortsetzung Nr. 29/1982

- H. Lacher Wasserfilmdicken auf Fahrbahnoberflächen
H. Lacher u. Schiffahrtsbedingte Wasserdruckausbreitung in Kanalböschungen
E. Zäschke
F. Thiele u. Probleme der Straßenentwässerung und neue Bemessungsmethoden
H. Lacher Die Berechnung der Ergiebigkeit von Drainagesystemen in horizontal
B. Söhngen, ausgedehnten Grundwassersystemen
H. Bischoff u.
H. Lacher Zur Begründung der Konzentrationszeit aus der Sicht der Hydraulik
H. Lacher Humor im Wasserbaulichen Versuchswesen: Versuchsanordnung zur
Bestimmung der äquivalenten Sandrauhigkeit von Steinzeugrohren

Nr. 30/1983

- Diverse Autoren Sammlung von Kurzberichten 1978 - 1983

Nr. 31/1983

- F. Thiele Fahrbahnlängsentwässerung im Straßengerinne und ein Entwurf für
zukünftige Richtlinien zur Bemessung

Nr. 32/1984

- U. Höfer Beginn der Sedimentbewegung bei Gewässersohlen mit Riffeln oder
Dünen

Nr. 33/1985

- G. Euler Die Berechnung des Schmutzwasserabflusses aus Niederschlägen:
C. Heinzelmann Eine vergleichende Darstellung und Wertung der Modellansätze
D. Jacobi

Nr. 34/1985

- H. Gerdes Berechnung dreidimensionaler Grundwasserströmung mit Mitteln der
ebenen Potentialtheorie am Beispiel des Sickerstollens

Nr. 35/1986

- Diverse Autoren Stofftransport im Wasser - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium
1985: Zusammenstellung der Referate

Nr. 36/1986

- R. Schröder Diskontinuierliche Abflußvorgänge in Freispiegelrinnen: Randwalzen
R. Schröder Die turbulente Strömung im freien Wechselsprung: Deckwalze
C. Kraus Walzenbildung im Kolk

Nr. 37/1987

- C. Heinzelmann Transportbeginn auf geriffelter Sohle unter dem Einfluß einer stationär
U. Höfer gleichförmigen Strömung mit überlagerter Schwallwelle

Nr. 38/1987

- F. Zior Regenwasserabfluß auf Fahrbahnoberflächen: experimentelle und
theoretische Untersuchungen

Nr. 39/1987

- B. Söhngen Das Formbeiwertkonzept zur Berechnung des Fließwiderstandes in Rohren
und Gerinnen

Nr. 40/1988

- Diverse Autoren Lösungsansätze zu aktuellen Problemen im Wasserbau - Darmstädter
Wasserbauliches Kolloquium 1987: Zusammenstellung der Referate

- Nr. 41/1987**
G. J. Weiß Abfluß- und Wasserstandssteuerung in offenen Gerinnen mit Hilfe selbstregulierender Schwimmkörper
- Nr. 42/1989**
H. Zaiß Simulation ereignisspezifischer Einflüsse des Niederschlag-Abfluß-Prozesses von Hochwasserereignissen kleiner Einzugsgebiete mit Niederschlag-Abfluß-Modellen
- Nr. 43/1990**
Diverse Autoren Hydraulik und Hydrologie im Stadtbauwesen - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1989: Zusammenstellung der Referate
- Nr. 44/1990**
H. Wegner Steuerung für kleine Hochwasserschutzräume
- Nr. 45/1991**
U. Drechsel Repräsentanz und Übertragbarkeit von Niederschlagsersatz-belastungen zur Durchführung von Schmutzfrachtberechnungen
- Nr. 46/1991**
J. Lang Analyse und Simulation des Feuchtekontinuums auf Straßenoberflächen
- Nr. 47/1992**
G. J. Weiß Sohlenbeanspruchung und Sedimenttransport unter Einzelwellen
- Nr. 48/1992**
C. Heinzemann Hydraulische Untersuchung über den Einfluß benthischer Diatomeenfilme auf Strömungswiderstand und Transportbeginn ebener Sandsohlen
- Nr. 49/1993**
J. Kühlborn Wachstum und Wanderung von Sedimentriffeln
- Nr. 50/1995**
M. Schuster Transportkritische Schubspannungen bei verschiedenen Sohlenzuständen, insbesondere unter Einzelwellenbelastung bei stationärer Grundströmung
- Nr. 51/1993** (vergriffen)
Diverse Autoren Dezentraler Hochwasserrückhalt - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1992: Zusammenstellung der Referate
- Nr. 52/1994**
N. Engel Hydrologische Simulation der Abflußtransformation in Kanalisationsnetzen
- Nr. 53/1995**
Diverse Autoren Die modellgestützte Bewirtschaftung intensiv genutzter Einzugsgebiete - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1994: Zusammenstellung der Referate
- Nr. 54/1996**
S. Wallisch Ein mathematisches Modell zur Berechnung der hydromechanischen Beanspruchung von Riffelsohlen

GESAMTVERZEICHNIS (ISSN 0340-4005)
der bisherigen Wasserbau-Mitteilungen der TH Darmstadt
(teilweise Kurztitel)

*Bestellungen beim
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik
Franziska-Braun-Straße 7, D-64287 Darmstadt
Selbstkostenpreis EURO 20,- je Heft*

- Heft 1/März 66** (vergriffen)
Bassler, F. Vorwort des Herausgebers
Linder, R. Hochwasserentlastung von Staustufen durch Schiffsschleusen
Bassler, F. Beginnt die Epoche der Gezeitenkraftwerke?
Elshazli, S. Die Bedeutung der Wasserkraft für die ägyptische Wirtschaft
- Heft 2/Juli 67** (vergriffen)
Uhlig, D. Probleme des landwirtschaftlichen Wasserbaus in Lybien
Bassler, F. Eindrücke vom ICID-Kongreß in Indien
Sauer, H.-D. Zentral messendes Wasserstands-Registriergerät für Modelle mit instationärer Strömung
Bassler, F. Die Nutzung von Meerwasser in der Kattara-Senke/Ägypten
- Heft 3/Dez. 68** (vergriffen)
Müller, J. Weltregister der Pumpspeicherkraftwerke
Bassler, F. Wasserwirtschaftliche Sonderaufgaben in Entwicklungsländern
Bayer, E. Die Versuchseinrichtungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Mäder, Ch. Die Exkursionen des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Bassler, F. Scheme for Qattara Depression/Egypt
- Heft 4/Aug. 69**
Bayer, E. Gestaltung der Rampenbauwerke für Flussfähren
- Heft 5/Nov. 69**
Sauer, H.-D. Industrierwasserentnahme aus schwebstoffreichen Flüssen
- Heft 6/Okt. 70**
Schröder, W. Ausbaugefällebemessung alluvialer Bachstrecken nach dem Sandtransportvermögen
- Heft 7/Feb. 71**
Müller, J. Auswirkungen eines Unterbeckens für Pumpspeicherung auf die Wasserwirtschaft
Bassler, F. Nuklearausbruch und Pumpspeicherung als Kostenfaktoren der Wasserkraftanlage in der Kattara-Senke/Ägypten
- Heft 8/Juli 71**
Bassler, F. 10 Jahre Lehre und Forschung in Wasserbau und Wasserwirtschaft an der Technischen Hochschule Darmstadt
Mäder, Ch. Modellversuche zur Umgestaltung des Mains bei Aschaffenburg
Schmidtke, R. Projektstudie zur Regelung des Rio Mantaro in der Hochebene von Huancayo/Peru
Schröder, W. Projektstudie zur Ufersicherung am Amazonas bei Iquitos/Peru
Sulser, P. Gedanken zu den Exkursionen eines Wasserbaulehrstuhls

Fortsetzung Heft 8/Juli 71

- Täubert, U. Modellversuche für Hochwasserentlastungsanlage Staudamm Poza Honda/Ecuador
Uhlig, D. Das Bewässerungsprojekt Al Hassa/Saudi Arabien
Bassler, F. Studieneinführung Bauingenieurwesen, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft

Heft 9/Nov. 71

- Mäder, Ch. Strömungen durch Luftblasenschleier in stehenden und fließenden Gewässern

Heft 10/Aug. 72

- Schmidtke, R. Ein Kostenzurechnungsmodell für wasserwirtschaftliche Mehrzweckprojekte

Heft 11/Dez. 73

- (vergriffen)
Sulser, P. Berührungslose Wasserstandsmessung mittels kontinuierlicher Kondensatorumladung
Börner, R. Internationale Pumpspeicherbibliographie 1900 bis 1960
Bassler, F. Solar Depression Power Plant of Qattara/Egypt
Täubert, U. Der Abfluß in Schußbrinnenversuchen
Bassler, F. Pumpspeicherkraftwerke an schiffbaren Wasserstraßen u. a.

Heft 12/Apr. 74

- Täubert, U. Wasserwirtschaftliche Systemanalyse des Wärmehaushalts von Flüssen

Heft 13/Dez. 75

- (vergriffen)
Bassler, F. Neue Vorschläge für die Entwicklung der Kattara-Senke/Ägypten
Bassler, F. New Proposals to Develop Qattara Depression/Egypt
Börner, R. Moorentwässerung in Finnland
Börner, R. Internationale Pumpspeicherbibliographie 1961 bis 1965
Gräb, E. Konstruktion und Umbau einer Kipprinne
Sulser, P. Die Wasserbau-Exkursionen des Instituts in den Jahren 1970 bis 1975, Forschungsvorhaben und Veröffentlichungen 1970 bis 1975

Heft 14/März 77

- Kriesel, E. Wasserwirtschaftliche Aspekte thermischer Energiequellen

Heft 15/Mai 77

- Börner, R. Einsatzmöglichkeiten der Mehrzweckpumpspeicherung in Entwicklungsländern

Heft 16/Juli 77

- (vergriffen)
Franzius, V. Der Sickerwasserabfluß aus Mülldeponien - Ein mathematisches Modell

Heft 17/ Aug. 77

- (vergriffen)
Tönsmann, F. Verringerung des Feststoffbetriebs in Entnahmebauwerken an Bächen

Heft 18/Dez. 77

- (vergriffen)
Bassler, F. Die Energiequellen Fluss- und Meerwasser
Bassler, F. Speisung der Schifffahrtskanäle mit Scheitelhaltung
u.a.
Bassler, F. 100 Jahre Bauingenieurwesen Arab Republic of Egypt : Qattara Depression
Bassler, F. Tätigkeiten als Ordinarius für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Heft 19/Dez. 78

- Sulser, P. Drucklufteinleitung in Flüsse zur Steuerung des Geschiebetransports

- Heft 20/Juni 79** (vergriffen)
Friedrich Bassler 70 Jahre/Ansprache und Aufsätze zu seiner Emeritierung
- Heft 21/März 81**
Döring, M. Einflüsse der Wassernutzung thermischer Kraftwerke auf Gewässer
- Heft 22/Aug. 83**
Albert, W. Solarteich - Kollektor und Wärmespeicher
Gonsowski, P. Bodenluftkompression bei Wasserinfiltration
Gonsowski, P. Selbstdichtung von Fließgewässern
Kaiser, W. Modellversuch HW-Entlastung Sösetalsperre
Wieland, H.
Krier, H. Erfahrungen bei Beregnungsanlagen im Hessischen Ried
Krier, H. Erosionsbeginn bei kohäsiver Wasserlaufsohle
Wieland, H. Modellversuch zur Hochwasser-Entlastung der Kulmke-Sperre/Harz
- Heft 23/Sep. 84** (vergriffen)
Kaiser, W. Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit durchströmten Ufergehölzzonen
- Heft 24/Feb. 85** (vergriffen)
Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1984 „Hochwasser am Oberrhein“
- Heft 25/Aug. 87**
Wieland, H. Hydraulische Bemessung von Tosbecken für Überfallstrahlen und der Druckbelastung der Sohle
- Heft 26/Feb. 87** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1986 „Planungsansätze Ökologie - Wasserwirtschaft, so nicht! - wie dann?“
- Heft 27/Juli 87**
Krier, H. Zum Langzeiterosionsverhalten kohäsiver Fließgewässersohlen
- Heft 28/Sep. 87**
Gonsowski, P. Der Einfluß der Bodenluftkompression auf die vertikale Infiltration von Wasser in Sanden
- Heft 29/Dez. 89** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1988 `Fließgewässer – Stillgewässer
- Heft 30/Dez.89** (vergriffen)
Albert, W. Die Gebietsverdunstung von Waldstandorten aus der Simulation von Grundwasserganglinien mit klimatischem Bodenwasserhaushaltsmodell
- Heft 31/Feb. 90**
Weiß, J. Berücksichtigung der Hysterse der Wasserspannung bei der Berechnung der vertikalen Wasserbewegung in natürlichen Sandböden
- Heft 32/März 90** Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Josef Mock
- Heft 33/Aug. 90**
Theune, Ch. Hydrological and Economical Aspects of Agronomically Productive Percolation Systems
- Heft 34/Dez. 90** (vergriffen)
Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1990
Umweltverträglichkeitsprüfung in der Wasserwirtschaft

- Heft 35/Nov. 91** (vergriffen)
Nuding, A. Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit Ufergebüsch - Entwicklung eines Fließgesetzes für Fließgewässer mit und ohne Gehölzufer, unter besonderer Berücksichtigung von Ufergebüsch
- Heft 36/Dez. 91** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1991 „Boden- und Grundwasserschutz - anwendungsorientierte Forschung und Verfahren“
- Heft 37/März 92**
Zimmermann, E. Phänomenologische Untersuchungen bei der Erosion einer kohäsiven Sohle
- Heft 38/Dez. 93** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1993 `Ökologisch orientierte Gewässersanierung und –pflege
- Heft 39/Dez. 93**
Ruiz Bodenluftströmung in teilgesättigten Böden
Rodriguez, E.
- Heft 40/Dez. 95** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1995 „Hochwassergefahren am Oberrhein“ und Fachseminar „Abflußabhängigkeit der morphologischen und biologischen Verhältnisse von Fließgewässern bei Niedrigwasser“
- Heft 41/Juli 99**
von der Hude Die Kapillarsperre als Oberflächenabdichtungssystem von Deponien und Altlasten - Rinnenversuche und Bemessungsregeln

Die Reihe der „Wasserbau-Mitteilungen der TH Darmstadt“ wird zusammen mit den „Technischen Berichten über Ingenieurhydrologie und Hydraulik“ als **„Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt“** (ISSN 1430-3434) fortgesetzt. Die neue Nummerierung ergibt sich aus der Summe der Hefte beider Vorgängerreihen.

Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt

GESAMTVERZEICHNIS (ISSN 1430-3434)

Selbstkostenpreis EURO 20,- je Heft. Bestellungen beim

*Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung
Franziska-Braun-Straße 7, D-64287 Darmstadt*

oder

*Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik
Franziska-Braun-Straße 7, D-64283 Darmstadt,*

- Heft 96/1996** (vergriffen)
Träbing, K. Ökomorphologische Kenngrößen für die Strukturvielfalt von Fließgewässern
- Heft 97/1997**
Jelinek, D. Die Kapillarsperre als Oberflächenbarriere für Deponien und Altlasten - Langzeitstudien und praktische Erfahrungen in Feldversuchen
- Heft 98/1997** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1996 `Numerische Simulationen im Wasserbau
- Heft 99/1997** Berichte zur Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung
- Heft 100/1998**
Kilian, T. Abflußcharakteristika und potentiell natürliche Gerinnegrundrißformen hessischer Fließgewässer
- Heft 101/1997**
Döring, M. Die römische Wasserleitung von Pödel im Val d'Aosta/Italien. Bestandsaufnahme des Bauwerks aus dem Jahre 3 v. Chr.
- Heft 102/1998**
Schmidt, T.R. Einfluß der Wandrauigkeitsstruktur auf die Geschwindigkeitsverteilung ausgebildeter, turbulenter Strömungen in Kreisrohren
- Heft 103/1998** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1997 „Betrieb und Steuerung von Speichern und Stauhaltungen unter sich ändernden Randbedingungen“
- Heft 104/1998**
Bettmann, T. Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung und deren Auswirkungen auf die Regenwasserbehandlung in urbanen Gewässereinzugsgebieten
- Heft 105/1998**
Seid, A.H. Modelling the Influence of Shrinkage Cracks on Overland Flow
- Heft 106/1999** (Nachdruck)
Zanke, U. Zur Physik von strömungsgetriebenem Sediment (Geschiebetrieb)
- Heft 107/1999**
Obermann, I. Modellierung des Wasserhaushaltes von Deponien vorbehandelter Siedlungsabfälle

Heft 108/1999	Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1998 Mischwasserbehandlung - Planung, Prüfung, Vollzug -
Heft 109/2000 Kämpf, M.	Fließprozesse in Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten - Grundlagen zur hydraulischen Bemessung
Heft 110/2000 Lempert, M.	Ein GIS gekoppeltes rasterbasiertes Modell zur Berechnung des Wasserhaushaltes kleiner Einzugsgebiete
Heft 111/2000	(vergriffen) Darmstädter Wasserbauliche Kolloquium 1999 „Fließ- und Ausbreitungsvorgänge in aquatischen Grenzräumen“
Heft 112/2000	100-Jahr-Feier des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft mit Festvortrag von Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. J. Plate
Heft 113/2000 Mehler, R.	(vergriffen) Mischwasserbehandlung - Verfahren und Modellierung
Heft 114/2000 Lenk, M.	(Nachdruck) Hydraulische Austauschvorgänge zwischen fließender Welle und Interstitial - Felduntersuchungen in einer Pool-Riffle-Sequenz an der oberen Lahn
Heft 115/2000 Saenger, N.	(Nachdruck) Identifikation von Austauschprozessen zwischen Fließgewässer und hyporheischer Zone
Heft 116/2000 Sieker, H.	Generelle Planung der Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten
Heft 117/2001 Hailu, D.	Optimal planning and water management of irrigation systems
Heft 118/2001 Lohr, H.	Simulation, Bewertung und Optimierung von Betriebsregeln für wasserwirtschaftliche Speichersysteme
Heft 119/2001 Bente, St.	Eine Software-gestützte Methodik zur Voreinschätzung der wasserwirtschaftlichen Auswirkungen von Maßnahmen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung
Heft 120/2001 Zanke, U.	Zum Einfluß der Turbulenz auf den Beginn der Sedimentbewegung
Heft 121/2002 Hirschhäuser, T., Zanke, U.	Morphologische Langfristprognose für das System Tidebecken-Außensände am Beispiel Sylts und der Dithmarscher Bucht
Heft 122/2002	Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 2000 Integrierte Gewässerbewirtschaftung in Verwaltung, Wissenschaft und Praxis
Heft 123/2002 Kraus, T.	Rauheitsänderung durch Biofilmbewuchs in Druckrohrleitungen
Heft 124/2002 Luckner, T.	Zum Bewegungsbeginn von Sedimenten

- Heft 125/2002**
Holfelder, T. Temperaturbeeinflusste Transportprozesse in Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten
- Heft 126/2003**
Mewis, P. Morphodynamisch-numerische Modellierung von Flußkurven
- Heft 127/2003**
Wetzstein, A. Berechnung von Entlastungsabflüssen an gedrosselten Streichwehren auf der Basis von gemessenen Wasserständen
- Heft 128/2003**
Hirschhäuser, T. Sedimentologische und biologische Aspekte der morphodynamischen Modellierung von Tidebecken
- Heft 129/2003**
Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 2003 „Hochwasserschutz“
- Heft 130/2003**
Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 2001
Aktuelle Themen aus Hydromechanik, Wasserbau und Hydrologie
- Heft 131/2003**
Witting, M. Simulation von Küstenlängs- und Küstenquertransport im 2DH-morphodynamischen Modell TIMOR3
- Heft 132/2003**
Krebs, M. Untersuchung instationärer oszillierender Strömungen in buhnenverbauten Flußabschnitten und ihre Bedeutung für morphodynamische Berechnungen
- Heft 133/2004**
Kudo, Eiji Sustainable Water Management in an Urbanizing River Basin in Japan, Based on Integrated Modeling Technique
- Heft 134/2005**
Gebrewubet, Y. Numerical Modeling of Koka Reservoir Sedimentation
- Heft 135/2006**
Schadrac, I. Nouvelle approche méthodologique pour l'analyse de la sécurité hydrologique des barrages en contexte sahélien soumis à une variabilité climatique
- Heft 136/2006**
Link, O. Untersuchung der Kolkung an einem schlanken zylindrischen Pfeiler in sandigem Boden
- Heft 137/2006**
Muschalla, D. Evolutionäre multikriterielle Optimierung komplexer wasserwirtschaftlicher Systeme
- Heft 138/2006**
Klawitter, A. Ein Modellkonzept zur integrativen Betrachtung von Urban- und Ruralhydrologie auf Einzugsgebietsebene
- Heft 139/2006**
Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium / DWA-Seminar 2005
„Feststofftransportmodelle“
- Heft 140/2006**
Wurpts, A. Numerische Simulation von Dichteeffekten am Beispiel der Umlagerung von Baggergut im Ästuarbereich

- Heft 141/2007**
Seydell, I. Einlagerung von Feinstoffen in eine Flusssohle und Wasseraustausch zwischen Fluss und Interstitial – Naturuntersuchungen an einer Kiesquerbank der Lahn bei Marburg
- Heft 142/2007**
Döring, M. Römische Häfen, Aquädukte und Zisternen in Campanien: Bestandsaufnahme der antiken Wasserbauten
- Heft 143/2007**
Winterscheid, A. Szenariotechnik im Hochwasserrisikomanagement
- Heft 144/2008**
Zanke, U.C.E. On Applicability of Morphodynamic Acceleration in Morphodynamic Simulations
- Heft 145/2009**
Schröter, K.A. Contribution to the Uncertainty Analysis of Distributed Hydrological Models
- Heft 146/2009**
Roland, A. Entwicklung von WWM II -Zur Seegangmodellierung auf unregelmäßigen Gitternetzen-
- Heft 147/2009**
Wiesemann, J.-U. Zum Sedimenttransport auf quergeneigter Sohle
- Heft 148/2009**
Zhou, X. Morphodynamic Response of Yangtze River Estuary to Sea Level Rise and Human Interferences
- Heft 149/2011**
Diab, R. ExperimentallInvestigation on Scouring around Piers of different Shape and Alignment in Gravel
- Heft 150/2015**
Nasner, H. Sedimentation in Brackwasserhäfen
Pieper, R.
Torn, P.

ISSN-Nr.: 1430-3434